

**UUDISTETUN JÄTEVESIASETUKSEN VAIKUTUSTEN
GIS-POHJAINEN MALLINTAMINEN PATTIJOESSA**

MATIAS VÄNTTILÄ

791631S

Pro gradu -tutkielma

Maantieteen tutkimusyksikkö

Oulun yliopisto

27.10.2020

Yksikkö: Maantieteen tutkimusyksikkö	Pääaine: Maantiede
Tekijä (Sukunimi ja etunimet, myös entinen sukunimi): Matias Vänttilä	Opiskelija-numero: 2371054 Tutkielman sivumäärä: 67 s. + liitteet 5 s.
Tutkielman nimi: Uudistetun jätevesiasetuksen vaikutusten GIS-pohjainen mallintaminen Pattijoessa	
Asiasanat: GIS, virtaussuunta-algoritmi, painotusrasteri, kuormitusmallinnus, jätevesi, haja-asutus	
Tiivistelmä: <p>Haja-asutuksen jätevesilainsäädäntöä on uudistettu useaan kertaan 2000-luvulla. Jotta lain tarkoituksenmukaisuutta voitaisiin nyt arvioida, syvennyttään tässä tutkimuksessa tarkastelemaan ja kehittämään menetelmiä kuormitusvaikutusten mallintamiseksi.</p> <p>Kuormitusvaikutusten tarkastelun lähtökohtana toimii paikkatietopohjainen valunnanmallinnus ja kolme mallinnuksessa käytettävää virtaussuunta-algoritmia: yksinkertainen ja tunnettu virtausmalli D8 sekä todenmukaisemmin maanmuotoja mallintavat monivirtaussuuntamallit MFD-md sekä D∞. Tutkimuksessa syvennyttään tarkemmin algoritmien perusteisiin sekä pyritään tarkastelemaan algoritmien vaikutuksia mallinnuksen kuormitustuloksissa. Tutkimuksen tavoitteena on myös soveltaa saatuja kuormitustuloksia tutkimusalueen vedenlaadun tilan muuttumisen arvioimisessa.</p> <p>Tutkimuksen kuormitusaineisto on koottu Raahen kaupungin ympäristönvalvonnassa toteutetun kyselyn aineistosta. Kyselyllä pyrittiin muodostamaan kokonaiskuva lainsäädännön vaatimista toimenpiteistä valvonta-alueen siirtymäaika-alueilla. Aineisto sisälsi 1450 vastausta ja ne kattoivat tämän työn tutkimusalueen rakennuksista noin 20 %. Vastausprosentti kyselyyn oli 60 %. Mallinnuksen pohja-aineistona toimi Maanmittauslaitoksen KM2-korkeusmalliaineisto. Alkuperäistä aineistoa käsiteltiin tutkimuksessa ennen varsinaista mallintamista.</p> <p>Työn keskeisinä tutkimustuloksina esiin nousivat mallinnetut paikalliset kuormitusvaikutukset, algoritmien yllättävät vaikutukset kuormitustuloksissa sekä painotusrasterin laajemmat sovellus- sekä kehittämismahdollisuudet. Mallinnettujen kuormitustulosten mukaan haja-asutuksen jätevesiasetus tulee parantamaan tutkimusalueen kokonaisravinnetilannetta fosforin osalta noin 8 % ja typen osalta noin 2 %. Kokonaisvaikutukset vaihtelevat alueellisesti alueiden ravinnekertymien rakenteiden mukaisesti.</p> <p>Virtaussuunta-algoritmien ominaisuudet aiheuttivat eroja ravinnekuormituksen kerryttämisessä. D8- ja D∞-algoritmit kerryttivät kuormitusta kohtalaisen samankaltaisesti, mutta MFD-md ominaisuudet tekivät algoritmin tuloksista vertailukelvottomia kahden muun algoritmin kanssa.</p> <p>Nykyiset vesistöjen ravinnekuormitusta mallintavat tutkimusartikkelit painottuvat hyvin monimutkaisiin tilastollisiin malleihin, jonka vuoksi yksinkertaiselle ymmärrettävälle mallintamiselle on tilaa tutkimuskentällä. Lisäksi tilastolliset mallit eivät kykene paikkatietopohjaisen mallintamisen tavoin spatiaalisesti eheään mallinnustulokseen. Painotusrasterin käyttömahdollisuuksia kehittämällä paikkatietopohjaisesta kuormitusmallinnuksesta voisi kehittyä uusi spatiaalisesti kattava ja helposti ymmärrettävä työkalu alan toimijoille.</p>	
Paikka ja päiväys:	Limingassa, 27.10.2020

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT

1. JOHDANTO.....	4
1.1 Tutkimuksen tausta.....	4
1.2 Tutkimusasetelma.....	7
2. PATTIJOKI TUTKIMUSALUEENA.....	10
2.1 Yleispiirteet ja topografia.....	10
2.2 Maankäyttö.....	11
2.3 Kuormitus ja vedenlaatu	12
3. HYDROLOGINEN MALLINNUS GEOINFORMATIIKASSA	14
3.1 Hydrologia geoinformatiikassa.....	14
3.2 Valunnan mallinnus	16
3.2.2 Virtaussuunta mallintamisen perustana	17
3.2.3 Korkeusmallin eheyttäminen	20
3.2.4 Virtaussuunta-algoritmeja.....	22
3.2.5 Valunnan kertymä	25
4. TUTKIMUSAINEISTOT JA TUTKIMUKSEN TOTEUTUS.....	27
4.1 Kuormitusaineisto.....	28
4.1.1 Jätevesikysely	28
4.1.2 Kuormitusaineiston koostaminen	30
4.1.2 Rakennuskohtaisen kuormituksen määrittäminen	32
4.2 Digitaalinen korkeusmalli	35
4.3 Kuormitusmallinnuksen toteutus	36
4.3.1 Korkeusmallin esikäsittely.....	36
4.3.3 Korkeusmallin eheyttäminen	39
4.3.4 Virtaussuunnan määrittäminen.....	40
4.3.5 Painotusrasteri ja kuormituksen kertymä	41
5. MALLINNUKSEN TULOKSET.....	42
5.1 Algoritmien yleistä käyttäytymistä	42
5.2 Algoritmien vaikutus kuormituksen kertymään.....	43
5.3 Jätevesiasetuksen kuormitusvaikutukset Pattijoessa	47
6. POHDINTA.....	53
7. TUNTEMUKSIA TUTKIMUKSEN VARRELTA	59
8. LÄHTEET	60
Kirjalliset lähteet	60
Verkkojulkaisut ja muut lähteet.....	66
Liitteet:	68

ALKUSANAT

Tämän pro gradu -tutkielman aihe alkoi muotoutua mielessäni, kun työskentelin Raahen kaupungilla ympäristön valvonnassa. Tuolloin päivän polttavana aiheena oleva “paskalaki” herätti mielenkiintoista keskustelua tavallisten kansalaisten keskuudessa. Päätin tarttua tilaisuuteen ja tutkia kyseisen lakimuutoksen vaikutuksia ja erityisesti niiden mallintamista työmaallani eli Pattijoen valuma-alueella. Toivottavasti tämä työ antaa vastauksia ja tarttumapintaa aiheeseen.

Raahen kaupunki tarjosi minulle mahdollisuuden ja tuen kattavan aineiston keräämiseen, asiantuntemusta jätevesi ja kuormitus asioissa sekä erinomaisen paikkatieto-ohjelmiston. Kiitos erityisesti Riikka ja Matti.

Maa- ja vesitekniikan tuki ry. ja Kerttu Saalasti säätiö tukivat työni tekemistä taloudellisesti, kiitos myös teille.

Työn kokonaisuuden ohjaamisesta ja erittäin nopeasta paikkatieto ongelmien ratkaisusta tahdon kiittää yliopistotutkija Harri Antikaista.

Suurin kiitos kuuluu silti vaimolleni Kaisulle, että mahdollistit tämän työn toteuttamisen vapaa-ajallamme työpäivien jälkeen sekä lomilla. Jospa tämän työn valmistuttua meillä on enemmän yhteistä aikaa perheen kanssa.

Limingassa, 27.10.2020

Matias Vänntilä

1. JOHDANTO

Työn johdannossa käydään läpi tutkimuksen lähtökohdat, tausta sekä esitellään tutkimukselle asetetut tavoitteet.

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa on noin 300 000 kiinteistöä, jotka sijaitsevat viemäriverkoston ulottumattomissa. Näillä kiinteistöillä asuu vajaa miljoona ihmistä. Viemäriverkoston puuttuessa heidän talousvetensä päätyvät erilaisten puhdistusjärjestelmien kautta kiinteistöjen lähiympäristöön. Vesihuollon näkökulmasta tällaisista kiinteistöistä muodostuvaa aluetta kutsutaan haja-asutusalueeksi ja kyseisellä alueella sijaitsevaa asutusta haja-asutukseksi (Heino 2017).

Luontoon päätyvät talousjätevedet ovat riski niin pinta- kuin pohjavesien laadulle, jonka vuoksi niiden käsittelyä on alettu ohjata lainsäädännöllä. Asiaan alettiin kiinnittää ensimmäisen kerran huomiota vesikäymälöiden yleistyessä 1950- ja 1960-luvuilla. Sen aikainen vesilaki edellytti käymäläjätettä sisältävän talousjäteveden käsittelyä saostuskaivojärjestelmällä. Tiedon lisääntyessä kuitenkin huomattiin, ettei sakokaivokäsittelyn teho ole riittävä. Suurin osa jätevesien kuormituksesta jatkaa matkaansa purkupaikkaan, usein avo-ojaan ja siitä lähimpään vesistöön (Kaloinen & Santala 2009: 7). Käsittelyjärjestelmän soveltuvuutta varten valtioneuvosto alkoi säätää 2000-luvulla asetuksia, joilla pyrittiin tehostamaan viemäriverkoston ulkopuolella syntyvien jätevesien puhdistusta. Aihe koskettaa meistä monia, joten se on ollut paljon pinnalla yhteiskunnallisessa keskustelussa sekä mediassa.

Pääsin työskentelemään aiheen parissa Raahen kaupungin ympäristönvalvonnassa. Jätevesijärjestelmän saneeraus aiheuttaa useille talouksille tuhansien eurojen kustannukset ja on siten merkittävä investointi yksittäisille talouksille. Lain todelliset ympäristövaikutukset mietityttivät kansalaisia. Jotta lain tarkoituksenmukaisuutta voitaisiin nyt arvioida, tässä tutkimuksessa syvennytään tarkastelemaan, kehittämään ja soveltamaan menetelmiä kuormitusvaikutusten mallintamiseksi. Tutkimuskohteeksi valikoitui lopulta Pattijoen vesistö, koska sen valuma-alue sisältyy kokonaisuudessaan Raahen kaupungin valvonnan alaisuuteen.

Tutkimustarkastelun lähtökohtana toimii paikkatietopohjainen mallintaminen. Näkökulma mahdollistaa tehokkaan työskentelyn ja arvioinnin spatiaalisesti moniulotteisen aineiston kanssa (Andreev 2019: 1). Paul Longely (Kemp 2008) nostaakin paikkatiedon vahvuuksista esille juuri sen spatiaalisen ulottuvuuden. Se tekee paikkatietojärjestelmistä erityisiä analysoitaessa alueellisesti haastavia prosesseja sekä eri tekijöiden välisiä suhteita. Andreev (2019: 1) lisää paikkatiedon vahvuuksiin myös kyvyn visualisoida, mallintaa ja ratkaista tilallis-ajallisia ongelmia. Paikkatietopohjainen mallintaminen antaa tutkimukselle mahdollisuuden syventää tarkastelunäkökulmaa ja tuoda tutkimukseen mukaan myös valuma-alueen sisäisen tarkastelun ulottuvuuden. Perinteisistä kuormituselvityksistä tämä usein puuttuu, sillä kuormitusmallinnukseen keskittyvät tutkimukset ja työkalut operoivat pitkälti valuma-aluekokonaisuuksien tasolla. Tästä syystä paikkatietopohjainen vesistönmallintaminen ja sen soveltaminen kuormitusmallinnuksessa avaavat mielenkiintoisen mahdollisuuden tutkimuksen tarkastelunäkökulmana.

Paikkatietoaineiston käsittelyyn tarvitaan paikkatietojärjestelmä, josta käytetään lyhennettä GIS (Geographical Information Systems). Se on Paul Longelyn mukaan (Kemp 2008) spatiaalisen tiedon käsittelyyn kehitetty alusta, joka pohjautuu geoinformatiikan tieteenalaan perustuviin tiedonkäsittelymenetelmiin. Tutkimuksessa hyödynnetään Esri:n ArcGIS Pro – ohjelmaa, joka on osa Esri:n ArcGIS–paikkatietoalustaa. Mallinnusmenetelmät perustuvat kolmeen erilaiseen virtaussuunta-algoritmiin: D8, MFD-md sekä D_{∞} (ks. kappale 3.2.4 Virtaussuunta-algoritmeja) ja niillä toteutettavaan valunnanmallinnukseen. Tutkimuksessa syvennyttään tarkemmin algoritmien perusteisiin sekä pyritään tarkastelemaan algoritmien vaikutuksia mallinnuksen kuormitustuloksissa. Mallinnuksen toteuttamisessa sovelletaan painotusrasterin käyttöä, jota on hyödynnetty niukasti tutkimusartikkeleissa. Tutkimuksen tavoitteena on myös soveltaa saatuja kuormitustuloksia tutkimusalueen vedenlaadun tilan arviointiin.

Nykyinen huomiota herättänyt jätevesipolitiikka otti ensi askeleet 1.1.2004, kun ensimmäinen kiinteistökohtaista jätevesien käsittelyä ohjaava asetus (542/2003) astui voimaan. Kiinteistökohtaisille jätevesijärjestelmille asetettiin puhdistusvaatimukset, koska asetuksen tavoitteena oli vähentää talousjätevesien päästöjä vesistöissä. Asetuksen (542/2003) 4 §:n mukaan poikkeusalueita lukuun ottamatta haja-asutuksesta ympäristöön

tuottamasta jätevedestä tulee puhdistaa orgaanisen aineen osalta vähintään 90 %, kokonaisfosforin osalta vähintään 85 % ja kokonaistypen osalta vähintään 40 %. Kyseiseen asetukseen sisältyi tuolloin 10 vuoden siirtymäaika, jonka aikana tarvittavat tehostamistoimet tulisi toteuttaa.

Asetuksen toteutuminen osoittautui ennakoitua haasteellisemmaksi erityisesti vanhojen kiinteistöjen osalta (Heino 2017: 1), joten vanha asetus päivitettiin uudella asetuksella (209/2011), joka tuli voimaan 15.3.2011. Olennaiset muutokset koskivat puhdistusvaatimusten lieventymistä, siirtymäajan pidentämistä sekä ikävapautusta. Uudet puhdistusvaatimukset asettivat vähimmäisvaatimukseksi orgaanisen aineen osalta 80 %, fosforista 70 % ja tystä 30 %. Asetuksen siirtymäaikaa pidennettiin 15.3.2016 asti. Lisäksi kaikki asetuksen säätämispäivänä 68 vuotta täyttäneet kiinteistöjen omistajat vapautettiin asetuksen vaatimuksista.

Vuonna 2015 hajajätevesityöryhmä antoi raportin, jonka mukaan 160 000 – 190 000 vakituisesti asuttua kiinteistöä oli edelleen vailla jätevesijärjestelmän saneerausta. Jätevesiasetuksen vaatimukset vaikuttivat edelleen osin kohtuuttomilta ja lain toimeenpano eteni huonosti. Uusi hallitus kirjasi hallitusohjelmaan hajajätevesisääntelyn selkeyttämisen ja kohtuullistamisen vuonna 2015 (Niiranen ym. 2015).

Hallitusohjelman kirjauksen pohjalta valmistui ympäristösuojelulain (527/2014) muutos (19/2017) sekä uusi talousjätevesien käsittelyä viemäriverkostojen ulkopuolisilla alueilla ohjaava asetus (157/2017), jotka astuivat voimaan huhtikuussa 2017. Uusien säädösten mukaan määräaikaan sidotut puhdistusvaatimukset rajattiin koskemaan vain vesistöjen 100 metrin rantavyöhykkeitä sekä pohjavesialueilla olevia ennen 2004 vuotta rakennettuja rakennuksia. Näin yli 100 metrin päässä rantaviivasta sekä pohjavesialueen ulkopuolella olevilta kiinteistöiltä edellytetään toimenpiteitä vasta seuraavan rakennuslupaa edellyttävän remontin yhteydessä (YSL 156 b §). Määräaikaan sidottujen kiinteistöjen siirtymäaikaa pidennettiin 31.10.2019 asti. Tämä säädös on tällä hetkellä lainvoimainen ja määräaika on umpeutunut. Työni Raahen ympäristönvalvonnassa keskittyi säädetyin jätevesilainsäädännön toteutumisen valvontaan Raahen ja Siikajoen kuntien alueella.

1.2 Tutkimusasetelma

Tutkimusasetelmaa muodostettaessa Raahessa oli tekeillä Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskuksen vetämä Pattijoen kuormitusselvitys. Selvitys sisälsi valuma- ja osavaluma-alue kohtaisen kokonaiskuormitustarkastelun, joka sisälsi myös haja-asutuksen osuuden kokonaiskuormituksesta. Selvityksessä tuotettua aineistoa sekä tuloksia otettiin hyödynnettäväksi myös tähän työhön. Selvitykset toteutti Finnish Consulting Group Oy (FCG). Selvityksen kuormitusarvot ovat määritetty valuma- ja osavaluma-alueiden purkupisteisiin tilastollisten pinta-ala muuttujien sekä Suomen ympäristökeskuksen ravinnekuormitusmalli VEMALA:n avulla.

Suomessa ravinnekuormituksen ja vedenlaadun mallinnukseen onkin keskittynyt Suomen ympäristökeskuksen vesistömallinnusosasto. Osasto on kehittänyt operatiivisen ravinnekuormitusmalli VEMALA:n, jolla voidaan simuloida päivittäistä vedenlaatua kaikissa Suomen joissa ja yli hehtaarin kokoisissa järvissä. Malli koostuu vesistöjen hydrologiaa, maa-aluemallia ja joki- tai järvimallia tarkastelevista osista (Huttunen ym. 2016). Hydrologisessa osassa mallinnetaan vesistöjen hydrologista kiertoa. Mallinnus perustuu pitkäaikaiseen säähavainto ja -ennuste dataan, kuten sadantaan, haihduntaan ja lämpötilaan (Vehviläinen 1994). Maa-aluemallissa tarkastellaan alueella muodostuvaa ravinnekuormitusta maankäytön eri muotojen ja haja-asutuksen perustella sekä sen suhdetta alueen valuntaan. Joki- ja järvimallissa huomioidaan ravinteiden kulkeutumis- tai massatasemalli mm. vesistön leveyden, pituuden, pinta-alan, syvyyden sekä tilavuuden perusteella. Näiden osien yhteistoiminnalla pystytään simuloimaan ravinnekuormaa sekä vedenlaatua Suomen vesistöissä sekä tarkastella mm. eri muuttujien vaikutusta vedenlaatuun. (Huttunen ym. 2016).

VEMALA laskee haja-asutuksen kuormitusosuuden hyödyntämällä tilastotietoja viemäriverkostoon liittymättömien asukkaiden ja asuinhuoneistojen määrästä haja-asutusalueilla ja taajamissa. Kiinteistöjen kuormitusarvot ovat määritetty yleisten ominaiskuormitusarvojen perusteella. Vesistökuormitusta vähentävänä tekijänä kuormitusluvuissa on otettu huomioon jätevesien purkupaikkojen etäisyys vesistöstä. Mallinnuksessa otetaan huomioon myös alueellinen arvio kiinteistökohtaisten puhdistamoiden keskimääräisestä puhdistustehosta (Hagman 2010, Huttunen 2020).

Yksinkertaiset ja laajoja alueita käsittelevät ravinnekuormitustutkimukset käyttävät tutkimusnäkökulmana usein valuma-alueiden kokonaistarkastelua. Etenkin alueellisesti epäselvän hajakuormituksen tarkastelu on helpompaa laajemmassa skaalassa, jossa sitä voidaan käsitellä tilastollisesti pinta-aloihin kytkettyinä muuttujina. Valuma-alueen kokonaistarkastelussa saadaan yksi kuormitusarvo vesistön purkupisteeseen. Tällaisten tutkimusten etuna on niiden ymmärrettävyys ja helppokäyttöisyys, mutta niistä uupuu kuormituksen spatiaalinen ulottuvuus tutkimusalueen sisällä (Yuan ym. 2020: 4). Esimerkiksi pistemäisissä kuormituslähteissä tarkastelunäkökulmana voi käyttää myös kuormituksen muodostumisen ja etenemisen tutkimista (esim. Schmidt ym. 2020). Kyseinen näkökulma pyrkii mallintamaan kuormituksen muodostumista ja sen rakennetta tarkastelualueen sisällä. Kuormitusarvot saadaan tällöin alueellisesti kattavammaksi.

Kansainväliset ravinnekuormitusta käsittelevät uudemmat tutkimusartikkelit painottuvat pitkälti eritasoihin hajakuormitusmalleihin. Niitä oli tarjolla runsaasti. Mallien rakenne, ominaisuudet ja monimutkaisuus vaihtelevat paljon, joten käyttäjän on usein hankala hahmottaa eri mallien sovellettavuutta, rajoituksia tai vahvuuksia (Yuan ym. 2020). Tätä taustaa vasten tutkimuksen yleiseksi tavoitteeksi muodostui yksinkertaisen paikkatietopohjaisen kuormitusmallintamisen toteuttaminen, jossa yhdistyvät hajakuormitus, valunnamallinnus, ymmärrettävyys sekä tarkastelualueen spatiaalinen ulottuvuus. Ongelmanratkaisun avaimena toimisivat paikkatietoaineistot, paikkatietojärjestelmä sekä kuormitusaineiston pohjana toimiva jätevesikysely. Ajallinen ulottuvuus tuodaan mukaan toistamalla simulointia eri ajankohtina. Tutkimuksessa painotetaan mallinnusmenetelmien tarkastelua, jotta mallinnuksen soveltuvuus, heikkoudet ja vahvuudet tulisivat lukijalle ymmärretyksi.

Tällaisia yksinkertaisia paikkatietopohjaisia valuntaan kytkeytyviä kuormitusmallinnuksia löytyi tutkimusartikkeleista niukasti. Löydetyt tutkimukset sivat ravinnekuormituksen ja valunnamallinnuksen yhdistelmää hieman erilaisista näkökulmista. Shrivastav ym. (2020) tutkivat peltojen ravinnevalunnan kulkeutumisreittejä kasvillisuuspuskureiden näkökulmasta. Valunnamallinnus ja reitinmäärittäminen eivät itsessään sisältäneet kuormitusarvoja. Souza ym. (2019) taas tutkivat kaupungin hulevesien valuntareittejä ja niiden kuljettamia ravinne- ja epäpuhtauskuormia. Tutkimus mallinsi hulevesien hydrologisia ominaisuuksia sekä

ravinteiden määrää eri pisteissä valuntareitin varrella. Tarkastelu ravinteiden osalta oli pistemäistä eikä alueellisesti kattavaa. Schmidt ym. (2020) sen sijaan tarkastelivat jätevesipuhdistamoilta tulevaa mikromuovikuormitusta ja sen kulkeutumista sekä kumuloitumista alueen vesistöissä. Tutkimuksessa joet kytkettiin verkoiksi jokien muodostamien solmukohtien avulla, jolloin kuormituksen kumuloituminen kertyi vaiheittain verkoston solmukohdissa. Spatiaalisesti eheämpiä valuntaa ja vesistöreitteihin kytkettyjä mallinuksia löytyi esimerkiksi hulevesimäärien mallinnuksesta (esim. Choi 2012) tai eroosiosedimenttien kulkeutumismallintamisesta (esim. Liu ym. 2007).

Tutkimuksella pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

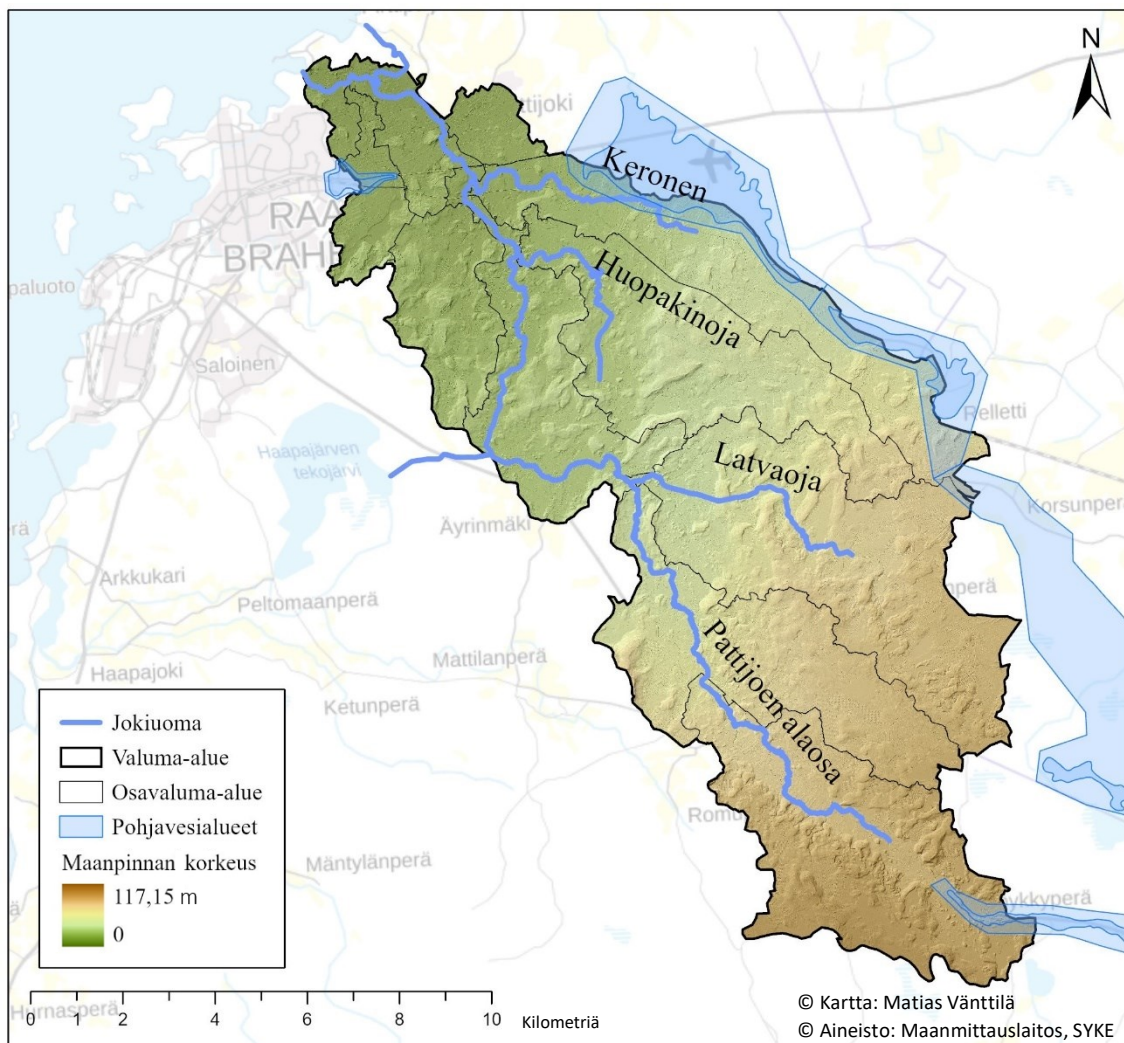
- Miten eri virtaussuunta-algoritmit käyttäytyvät pistemäisten kuormituslähteiden valunnamallinnuksessa tutkimusalueella?
- Miten algoritmit vaikuttavat kuormituksen kertymään Pattijoen vesistössä?
- Millaiset kuormitusvaikutukset uudella jätevesiasetuksella on Pattijoen valuma-alueella?
- Miten uudistettu jätevesiasetus vaikuttaa Pattijoen vedenlaatuun?

2. PATTIJOKI TUTKIMUSALUEENA

Tässä osiossa esitellään yleisesti työn tutkimusalue, sekä oleelliset tiedot tarkasteltavan valuma-alueen ominaisuuksista.

2.1 Yleispiirteet ja topografia

Pattijoen jokiuoma (kuva 1) sijaitsee Raahen kaupungin alueella Pohjois-Pohjanmaalla. Se on noin 34 km pitkä ja laskee Raahen taajaman pohjoispuolella Perämereen (FCG 2019). Vuoteen 2003 asti Pattijoki oli myös itsenäinen kunta ennen kuin se liitettiin Raahen (Raahen kaupunki 2019). Valuma-alueen sijainti alavalla merenrannikolla pitää sen korkeuserot maltillisina (Maakuntavaltuusto 2007).

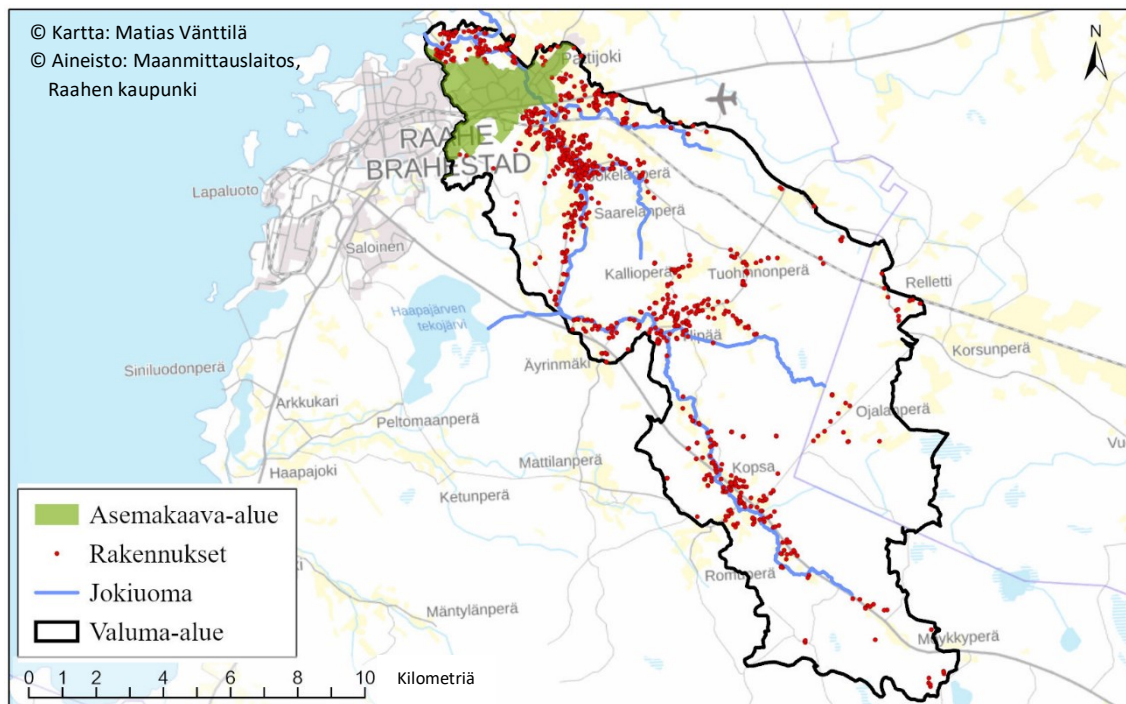


Kuva 1. Pattijoen valuma-alue, pääuoma sekä joen tärkeimmät sivu-uomat.

Putouskorkeutta uomalle kertyy korkeusmalliaineiston mukaan noin 97 m ja valuma-alueen korkein kohta ulottuu noin 117 metriä merenpinnan yläpuolelle. Pattijoesta johdetaan vettä täyttökanavalla myös Haapajärven tekojärveen SSAB:n terästehtaan vedenoton turvaamiseksi. Jokea on suoristettu ja siihen on rakennettu kolme pohjapatoa. Pattijoen valuma-alue on noin 140 km² ja järvisyys 0 %. Valuma-alueen itäosat ulottuvat myös Siikajoen kunnan puolelle. Itäpuolella sijaitsevat myös pääosa valuma-alueelle ulottuvista pohjavesialueista. Joen suurimmat sivu-uomat ovat Latvaolja, Keronen ja Huopakinoja (FCG 2019).

2.2 Maankäyttö

Pattijoen valuma-alue muodostuu pääosin (noin 80 %) metsätalousvaltaisista alueista. Laajimmat maatalouskäytössä olevat alueet painottuvat jokiuoman varteen ja ne kattavat noin 12,5 % koko valuma-alueesta. Asuin- ja teollisuus alueet (6,5 %) taas keskittyvät Raahen taajaman läheisyyteen. Eri maankäyttömuotojen pinta-alat on määritetty Suomen ympäristökeskuksen CORINE Land Cover 2012 (20 m) -aineiston perusteella (Corine maanpeite 2012). Pääosa valuma-alueen haja-asutuksesta sijoittuu joen pää- ja sivu-uomien läheisyyteen (kuva 2).

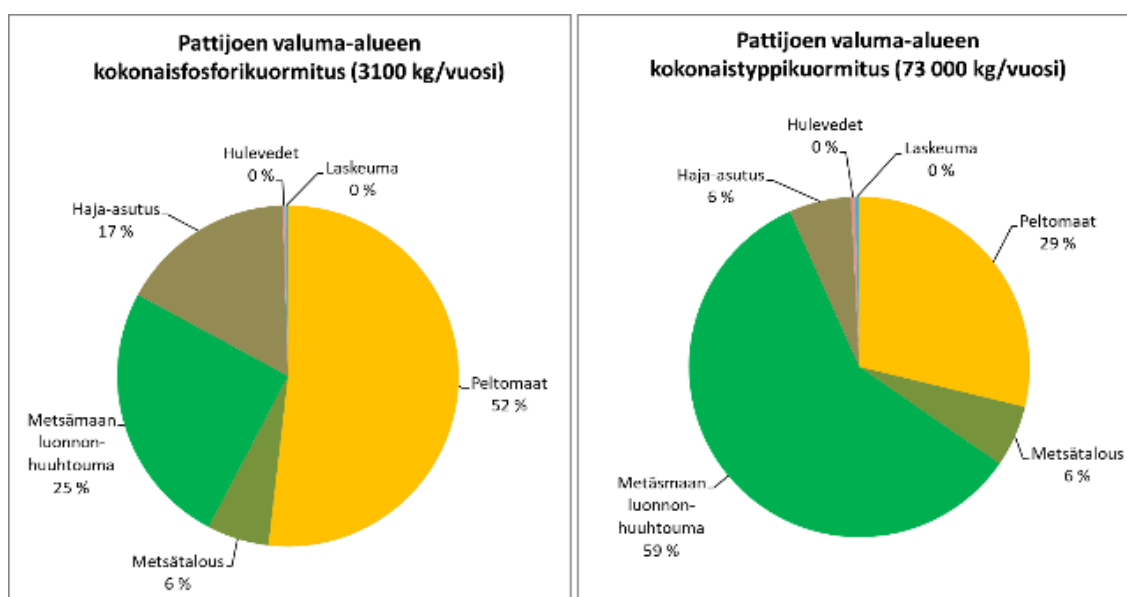


Kuva 2. Haja-asutuksen ja asemakaavan sijoittuminen Pattijoen valuma-alueelle.

Ydinkaupungin ja sen lähialueiden asutus sijoittuu asemakaava-alueelle, joten rakennukset ovat liitetty viemäriverkostoon eivätkä ne kuulu haja-asutukseen. Valuma-alueen haja-asutus muodostuu noin 1500 vakituisesti asuvasta ihmisestä, sekä mahdollisista ulkopuolisista vapaa-ajan asuntojen käyttäjistä. Valuma-alueen haja-asutusalueelle sijoittuu yhteensä 880 rakennusta, joista valtaosa on asuinrakennuksia. Erillisiä vapaa-ajan asuntoja, saunarakennuksia, nuoriso- ja seuraintaloja tai muita vakituisesta asumisesta eroavia on noin 15 % rakennuksien kokonaismäärästä.

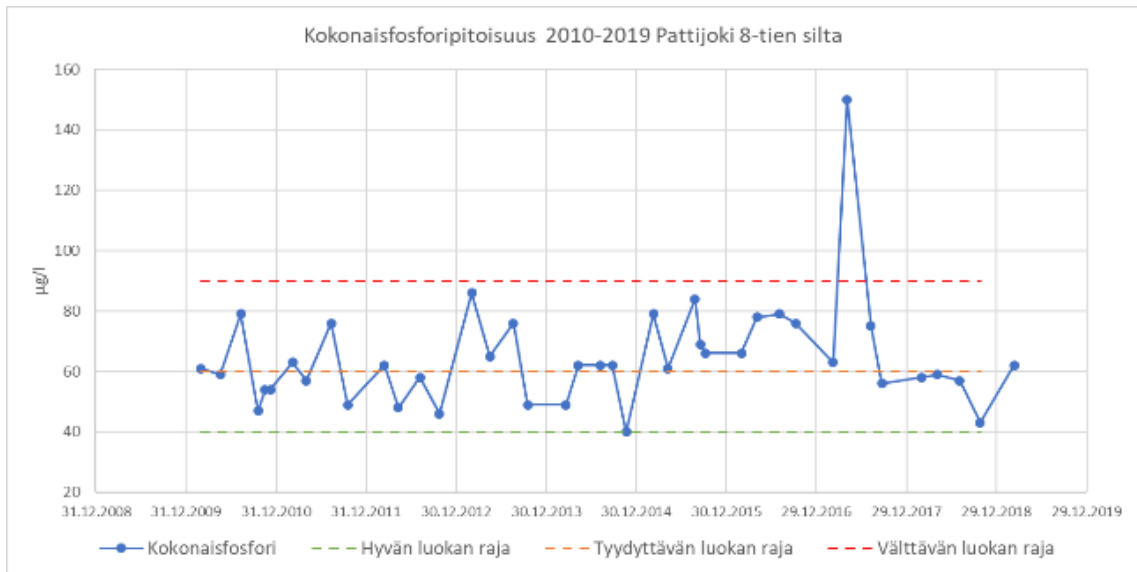
2.3 Kuormitus ja vedenlaatu

Pattijoen valuma-alueen kokonaisfosforikuormituksesta vähän yli puolet (52 %) ja kokonaistyyppikuormituksesta alle kolmannes (29 %) muodostuvat peltoviljelystä ja peltomaiden luonnonhuuhtoumasta (kuva 3). Kokonaistypen kuormituksesta pääosa (59 %) muodostuu metsä- ja suomaan luonnonhuuhtoumasta, kun taas kokonaisfosforin määrästä se kattaa noin neljänneksen (25 %). Metsätalouden toimenpiteiden osuus ravinnekuormituksista on 6 %. Tutkimuksen pääkohteena olevat haja-asutuksen jätevedet muodostavat 17 % kokonaisfosforikuormituksesta ja 6 % kokonaistyyppikuormituksesta. Muiden ravinnelähteiden osuudet ovat pieniä.



Kuva 3. Pattijoen valuma-alueen kokonaisfosfori- ja tyyppikuormituksen muodostuminen Pattijoen kuormitusselvityksen mukaan (FCG 2019).

Pattijoki luokitellaan keskiuureksi turvemaiden joeksi. Joen keskimääräinen vedenlaatu 8-tien sillan näytepisteellä on ollut kokonaisfosforipitoisuudelta 65 µg/l ja kokonaistyyppipitoisuudelta 980 µg/l vuosina 2010–2018 (Hertta ympäristötietojärjestelmä 2019). Keskimääräinen kokonaisfosforipitoisuus ilmentää välttävää tilaa ja -tyyppipitoisuus tyydyttävää tilaa ekologisessa luokittelussa (FCG 2019).



Kuva 4. Pattijoen kokonaisfosforipitoisuuden kehitys sekä ekologisen luokittelun rajat (FCG 2019).



Kuva 5. Pattijoen kokonaistyyppipitoisuuden kehitys sekä ekologisen luokittelun rajat (FCG 2019).

3. HYDROLOGINEN MALLINNUS GEOINFORMATIIKASSA

Tämä luku käsittelee tutkimuksen keskeisen teorian. Luvun alussa tarkastellaan hydrologian asemaa geoinformatiikassa, jonka jälkeen syvennyttään tarkemmin valunnamallinnuksen teoriaan. Teoriaosion pääpaino kohdistuu analyysissä käytettävien työkalujen toimintaan.

3.1 Hydrologia geoinformatiikassa

Vesistöjen pitkäaikaiset seurantatiedot ja tutkimusmenetelmien kehittyminen ovat mahdollistaneet paikkatiedon hyödyntämisen myös vesistöntutkimuksessa (Matejcek 2010). Hydrologisten analyysien algoritmit ovat rakennettu Jensonin ja Dominguen (1988: 1593) mukaan useimmissa paikkatietojärjestelmissä rasteripohjaisen aineiston ympärille. Hydrologisissa tutkimuksissa käytetään aineistoina esimerkiksi kaukokartoitusaineistoja, maanpeite- ja maankäyttökarttoja, pohjavesivarantotietoja ja etenkin maanpinnan muotoja kuvaavaa korkeusmallia. Hilamuotoinen tasasivuisista neliöistä koostuva maanpinnan korkeutta kuvaava korkeusmalli toimii usein pääasiallisena pohja-aineistona valunnamallintamisessa (Mujumdar & Nagesh 2012: 120). Paikkatietojärjestelmien hydrologiaan kehitetyillä työkaluilla pystytään mallintamaan veden valuntaa, kuten valunnam suuntaa, ominaisuuksia, kertymää ja muutoksia (ArcGIS Pro 2019).

Spatiaalisen tiedon digitalisoituminen ja tietotekniikan nopea kehittyminen ovat laajentaneet paikkatietojärjestelmien potentiaalia. Yhä kattavampia aineistoja voidaan sisällyttää myös paikkatietopohjaisiin hydrologisiin simulaatioihin. Vesistöntutkimukset tuottavat hydrologisia prosesseja mallintamalla tietoa niin tieteen, suunnittelun kuin päätöksentekijöidenkin tarpeeseen (Mujumdar & Nagesh 2012: 120, Wang ym. 2017: 1, Shahab 2008: 2). Tavallisia vesistöntutkimuksissa tarkasteltavia kohteita ovat valuma-alueiden määrittäminen sekä hydrologisten ja fysikaaliskemiallisten ominaisuuksien tarkastelu. Alan tutkimukset käsittelevät esimerkiksi tulvien, saasteiden kulkeutumisen tai pohjavesivarantojen mallintamista. (Matejcek 2010, Kemp 2008, Nielson 2014).

Albrecht (2007: 59) toteaa GIS-ympäristössä tapahtuvan vesistönmallintamisen kehittyneen vasta, kun kolmiulotteinen tieto onnistuttiin sulattamaan osaksi paikkatietojärjestelmiä. Perinteinen CAD (Computer Assisted Detection) - ohjelmissa käytetty 3D rautalankaesitysmalli (wireframe) ei ollut tiedostorakenteena optimaalinen paikkatietojärjestelmille. Tästä ongelmasta onnistuttiin pääsemään yli luomalla korkeusulottuvuus rasterimuotoiseen tietorakenteeseen. Paikkatietojärjestelmissä käsiteltävä tieto on joko rasteri- tai vektorimuotoista. Rasteriaineisto muodostuu säännöllisestä ruudukosta, jossa yksittäistä ruutua kutsutaan soluksi tai pikseliksi. Yksi tällainen ruutu ilmentää sijainti- ja ominaisuustietoa yhdestä Maan pinnan kohdasta. Ruutujen koko määrittelee rasteriaineiston tarkkuuden eli resoluution (Galati 2006: 158). Rasterimuotoinen tietorakenne antaa paikkatietojärjestelmille mahdollisuuden erottua muista järjestelmistä spatiaalisen analysointikapasiteetin vuoksi (Albrecht 2007: 59).

Rasteripohjaisten algoritmien kehitys vesistönmallinnukseen on sisältänyt Choin (2011: 81) mukaan myös haasteita. Algoritmit toimivat usein parhaiten luonnollisissa ympäristöissä ja ihmistoiminnan vaikutusten huomioiminen ei ole ollut ongelmatonta. Vesistöjen ja sadevesien johtamiseen rakennettu infrastruktuuri muuttaa veden luonnollista kulkua ja on näin haastavampaa mallintaa. Lisäksi sadevesijärjestelmät sijoitetaan yleensä maanpinnan alapuolelle, jolloin perinteisistä maanpintaa kuvaavista aineistoista niitä ei pystytä havaitsemaan. Ongelmien ratkaisemiseksi on kehitetty yhä hienostuneempia algoritmeja.

Myös aineiston rasteripohjaisuudessa on omat heikkoutensa. Bertolo (2000: 2) muistuttaa, että rasteripohjaisuus ei aina kykene ilmentämään nopeasti muuttuvia topografisia ominaisuuksia. Aineistorakenne yksinkertaistaa erityisesti topografisesti monimutkaisia alueita. Bertolo kylläkin huomauttaa tarkan pohja-aineiston kompensoivan menestyksekkäästi näitä puutteita. On hyvä huomioida, että Bertolo käsittelee aineistoja 2000-luvun vaihteen näkökulmasta, jolloin artikkelin ”tarkan” aineiston resoluutiot olivat muutamia kymmeniä metrejä. Mittaustekniikat ja käytettävissä olevat aineistot ovat kehittyneet paljon 20 vuodessa.

3.2 Valunnan mallinnus

Valunnan mallintaminen on hydrologiaan sisältyvä analyysi (Jenson & Domingue 1988: 1593). Se on vahvasti sidoksissa topografiseen tietoon, sillä valunta saa liikkeensä maanpinnan korkeuseroista (Mujumdar & Nagesh 2012: 120). Valuntaa ja maanpinnan kaltevuuden ominaisuuksia tarkastelevat työkalut ovatkin hyvin samankaltaisia. Ne sisältävät kuitenkin Jensonin ja Domingue (1988: 1593) mukaan omat erityispiirteensä, jonka vuoksi hydrologia tarvitsee omia työkaluja. Niissä keskitytään ratkaisemaan erityisesti hydrologiaan liittyviä ongelmatilanteita.

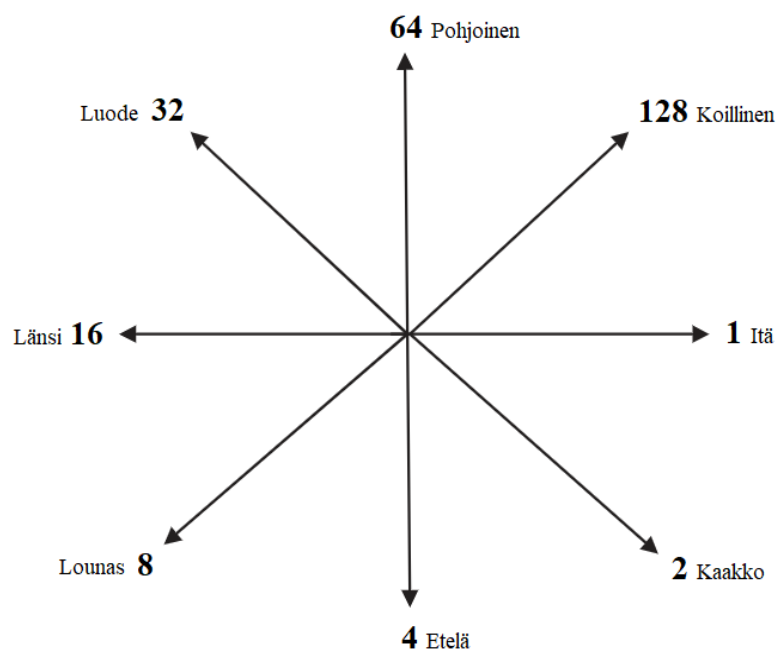
Hydrologiset analyysit ovat yksittäistä solua laajempia analyysimenetelmiä eli aluefunktioita, joista käytetään nimitystä naapurustoanalyysit (neighborhood analysis). Naapurustoanalyyseissä tarkastellaan yksittäistä solua sen viereisten solujen eli naapurisolujen avulla. Tarkasteltava naapurusto muodostetaan halutun kokoisen tarkastelukehyksen avulla. Kyseisistä analyyseistä käytetään myös nimitystä focal-analyysit (Albercht 2007: 55–56, Kemp 2008: 356). Tarkastelukehystä kutsutaan ns. liikkuvaksi ikkunaksi (moving/scanning window), joka määrittelee tarkastelukohtena olevalle solulle analysoitavan naapuruston. Liikkuva ikkuna voi muodostua esimerkiksi 3 x 3 solun kokoisesta kehyksestä, joka kulkee solu solulta rasterin läpi tuottaen solujen naapuruston perusteella jokaiselle solulle arvon tulorasteriin. Tarkastelukehyksen laajuus, muoto ja painotus ovat kuitenkin valittavissa ja säädettävissä erilaisten parametrien avulla tarpeisiin sopiviksi (Neteler & Mitasova 2008: 92). Hydrologisissa analyyseissä rasteripohjaista korkeusmalliaineistoa analysoidaan perinteisesti naapurustoanalyysillä juuri 3 x 3 solun kokoisella tarkastelukehyksellä (Jenson & Domingue 1988:1593).

Albercht (2007: 63) muotoilee kirjassaan valunnanmallinnuksen kiteytyvän ajatukseen, että vesipisaran kohdatessa rasterin voidaan maaperän kaltevuussuunnan avulla olettaa mihin suuntaan vesipisara lähtee valumaan. Digitaalinen korkeusmalli toimii tässä maaperän pinnanmuotojen ilmentäjänä (Choi 2012: 81). Maaperän kaltevuussuunnasta voidaan johtaa koko tarkastelualueelle virtaussuuntarasteri. Virtaussuuntarasterista pystytään tarkastelemaan mihin vesipisaran valunta kohdistuu jokaisesta yksittäisestä solusta. Tämä toimii perustana virtauskertymä rasterin muodostamiselle. Siinä tarkastellaan jokaista solua seuraavasta näkökulmasta: kuinka

monen solun valunnan tarkasteltava solu vastaanottaa ja mihin soluun se kohdistaa itseensä kertyneen valunnan Albercht (2007: 63). Jenson ja Dominique (1988: 1593) mainitsevatkin, että hydrologisten analyysien pohjaksi on tarpeen tuottaa juuri virtaussuunta- ja virtauskertymämatrisi, sillä ne toimivat perustana useimpiin haluttuihin jatkoanalyysihin.

3.2.2 Virtaussuunta mallintamisen perustana

Valunnanmallintamisessa virtaussuunnan (flow direction) määrittäminen maaperän kaltevuuden avulla toimii siis koko työskentelyn perustana (Qin ym 2007: 5). Useimmat paikkatietojärjestelmät käyttävät tähän D8-algoritmia (Mujumdar & Nagesh 2012: 126). D8-algoritmi määrittää jokaiselle solulle yhden kahdeksasta naapurisolusta, johon kyseisen solun valunta kohdistuu (Greenlee 1987: 1383).



Kuva 6. D8-algoritmin virtaussuunta vaihtoehdot ja niitä ilmentävät suuntanumerot.

Analyysissä virtaussuunnat esitetään virtaussuuntaa ilmentävillä numeroilla, jotka määräytyvät kuvan 6 esittämällä tavalla (Mujumdar & Nagesh 2012: 126). Esimerkiksi jos solu x virtaa vasemmalle, sen virtaussuunnaksi koodataan 16 (Jenson & Domingue, 1988: 1594). Tarkasteltavan solun virtaussuunta kohdistuu jyrkimmän virtaussuunnan naapurisolun (Jenson & Domingue, 1988: 1594). Kaltevuus lasketaan D8-algoritmilla seuraavasti:

$$S_{D8} = \max_{i=1,8} \frac{Z_9 - Z_i}{h\emptyset(i)}$$

jossa $\emptyset(i) = 1$ pääilmansuunnan (pohjoinen, etelä, itä ja länsi) naapureille ja $\emptyset(i) = \sqrt{2}$ diagonaali naapureille (koillinen, kaakko, lounas, luode) (Salmi ym. 2013: 9). Virtaussuunnan jyrkkyys määritetään siis vähentämällä naapurisolun korkeusarvo tarkasteltavasta solusta ja jakamalla se solukeskipisteiden välisellä etäisyydellä. Olettamalla solukoko 1 suuruisiksi pääilmansuunnissa olevat solut jaetaan yhdellä ja diagonaali solut $\sqrt{2}$. Kulmassa olevien solukeskipisteen etäisyys on suurempi kuin kohtisuoraan vieressä olevilla (Jenson & Domingue, 1988: 1594).

Kuvassa 7 olevassa esimerkissä on tarkasteltu solun arvolta 67 virtaussuuntaa. Tarkastelusolua pienempi korkeusarvo on sen kolmessa naapurisolussa (56, 44, 53). Näistä soluista määritetään jyrkin virtaussuunta kuvassa 7 esitetyllä tavalla. Valunta kohdistuu jyrkimmin soluun 44, joten tarkastelusolun virtaussuunnaksi koodataan numero 2.

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

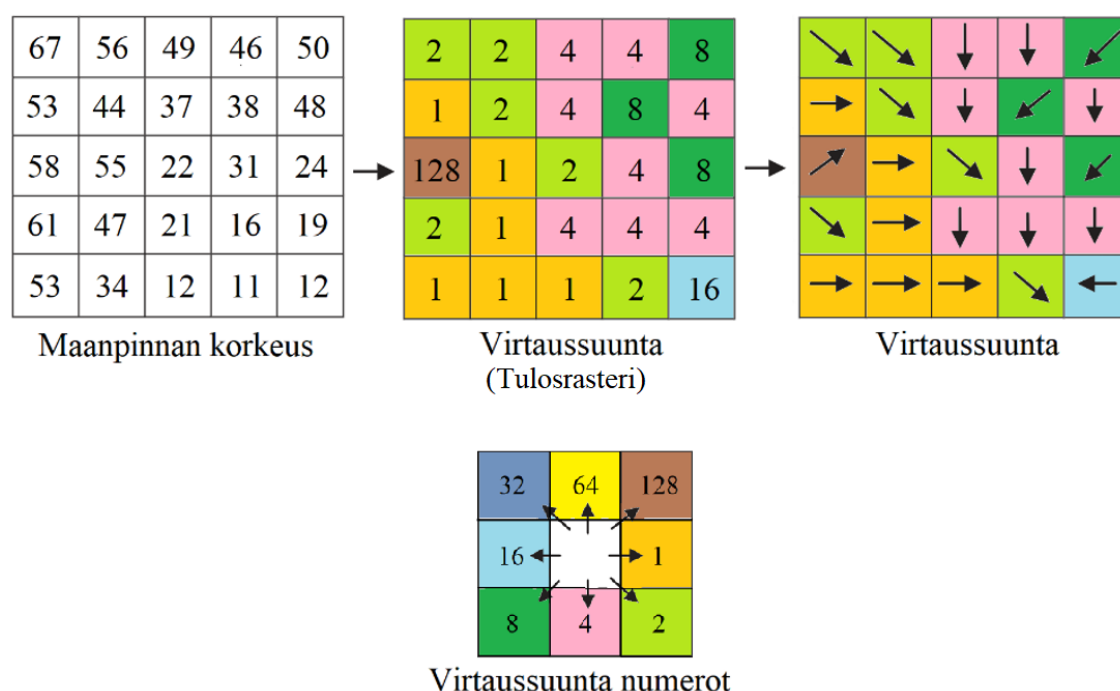
$$\text{Kaltevuus} = \frac{67 - 56}{1} = 11.00 \quad \text{Kaltevuus} = \frac{67 - 44}{\sqrt{2}} = 16.26 \quad \text{Kaltevuus} = \frac{67 - 53}{1} = 14.00$$

Kuva 7. Esimerkki korkeusmallin avulla laskettavasta virtaussuunnasta tarkastelukehyksessä.

Virtaussuunnan määrittämisen perusteet nojautuvat usein Jenson & Domingue (1988) kirjoittaman artikkelin teoriaan. Paikkatietojärjestelmissä virtausjyrkkyyttä saatetaan tosin käsitellä prosentuaalisesti alla esitetyn kaavan mukaisesti (ArcGIS Pro 2019).

$$jyrkin_virtaussuunta = z\text{-arvon_muutos} / etäisyys * 100$$

Virtaussuuntarasteri muodostuu lopulta virtaussuuntaa ilmentävistä numeroista, kuten kuvassa 8 on esitetty.



Kuva 8. Korkeusmallista johdettava tulosrasteri ja virtaussuuntia ilmentävät virtausnuolet.

Virtaussuunnan määrittämiseen D8-algoritmillä sisältyy myös erityistapauksia. Jos virtausjyrkkyyks on sama kahteen tai useampaan naapurisoluun yhtä aikaan, muodostuu virtaussuuntaa koodaava numero jyrkimpien solujen virtaussuuntaa ilmentävien koodien summana. Kahdeksan päävirtaussuuntakoodin (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ja 128) lisäksi on siis olemassa 248 muuta naapurisolujen yhteisvaikutusta ilmentävää yksilöllistä virtauskombinaatiokoodia (Greenlee 1988: 1383–1384). Toinen erityistapaus ilmenee täysin tasaisilla alueilla. Tällöin virtaussuunnat määritetään iteroimalla. Jokaisessa iteraatiossa määrittämättömät solut osoitetaan virtaamaan naapurisoluun sillä ehdolla, että virtaussuunta ei osoita takaisin tarkasteltavaan soluun. Iteraatioita suoritetaan niin

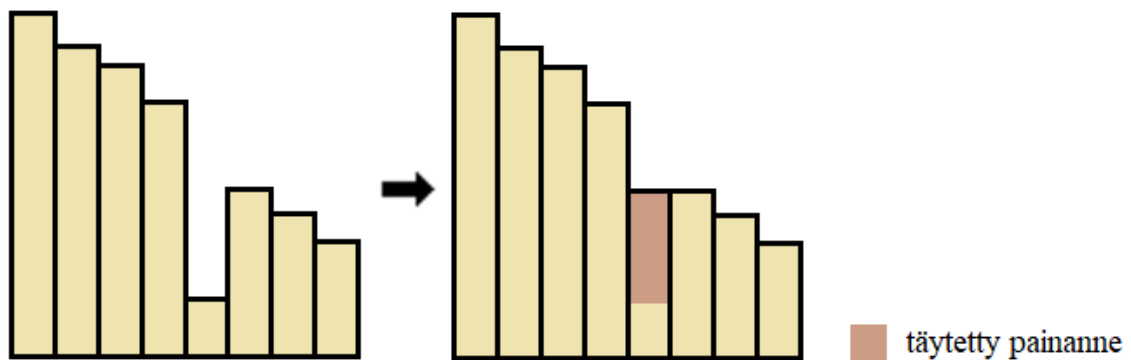
monta, että kaikille tasaisen alueen soluille on saatu määritettyä virtaussuunta (Jenson & Domingue, 1988: 1594).

Virtaussuunnan määrittämisessä on lisäksi huomioitava korkeusmallin sisältämät painanteet (sink), jotka haittaavat valunnan kulkureittien muodostumista. Painanteella tarkoitetaan korkeusmallissa esiintyvää syvennystä, jossa kahden tai useamman solun virtaukset osoittavat toisiinsa. Kyseisessä tilanteessa virtaussuuntien kumuloituva ketju katkeaa. (Jenson & Domingue, 1988: 1593).

3.2.3 Korkeusmallin eheyttäminen

Hydrologisessa mallintamisessa on siis tavallisesti lähdettävä liikkeelle alkuperäisen korkeusmallin hydrologisesta eheyttämisestä (Jenson & Domingue 1988: 1593). Hydrologinen eheyttäminen tarkoittaa maanpintarastereissa olevien painanteiden täyttämistä (Greenlee 1987: 1384). Painanteilla tarkoitetaan solua tai soluista muodostuvaa aluetta, jonka ympäröivät solut ovat kyseistä kohtaa korkeammalla. Tällaisissa tilanteissa veden valunnansuuntaa ei voida määrittää ja valunnan tulkitaan päättyvän painanteeseen. Todellisuudessa veden valunta jatkaisi eteenpäin painanteen täyttyessä vedellä. Tällaisia painanteita ovat esimerkiksi maaperän luonnolliset kuopat tai louhokset, mutta usein myös aineistossa esiintyvät virhearvot (Jenson & Domingue 1988:1593, O’Callaghan & Mark 1984: 323). Veden valunnan jatkuminen on tärkeää, koska hydrologisilla malleilla pyritään selvittämään fluviaalisten prosessien ja esimerkiksi niiden mukana kulkeutuvien ainesten etenemistä (O’Callaghan & Mark 1984: 323).

1980-luvun alkupuolella O’Callaghan ja Mark (1984) pyrkivät ratkaisemaan ongelman tasoittamalla (smoothing) digitaalista korkeusmallia, mutta se ei kyennyt eheyttämään kattavasti ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia painanteita. Etenkin syvät kuopat jäivät edelleen nieluiksi ja lisäksi tasoittamisen seurauksena menetettiin merkittävästi tietoa alkuperäisestä korkeusmallista (Bertolo 2000: 8). 80-luvun edetessä esimerkiksi O’Callaghan ja Mark (1984) sekä Jenson ja Trautwein (1987) sen sijaan täyttivät painanteet lisäämällä painanteissa olevan solun arvoksi alimman naapurisolun arvon (kuva 9).



Kuva 9. Periaatekuva painanteen täyttämisestä alimman purkupisteen korkeuteen.

Painanteessa olevan solun korkeus nousee tällöin painanteen alimman purkupisteen korkeuteen. Tähän päätyivät myös Jensen ja Domingue (1988) D8-algoritmin syntyartikkelissa. Kyseistä menetelmää sovelletaan laajasti korkeusmallin eheyttämisessä.

Korkeusmallien resoluutiot ovat parantuneet 1980-luvun lopulta, joten Jensenin ja Dominguen (1988) alkuperäiselle eheyttämisalgoritmilta on kehitetty laskentatavaltaan tehokkaampia vaihtoehtoja. Periaate niissä on pysynyt silti pohjimmiltaan samana. Korkeusmallin painanteet täytetään iteroimalla ne alimman naapurisolun korkeuteen (Planchon & Darboux 2002: 163). Esimerkiksi Tarbotonin ym. (1991) sekä Planchon & Darbouxin (2002) artikkeleihin perustuva korkeusmallin eheyttäminen mahdollistaa myös täytettävien painanteiden koolle asetettavat rajoitukset. Painanteille voidaan määrittää raja-arvo z , joka määrittelee sallitun eron painanteen syvyyden ja purkupisteen (pour point) välillä. Raja-arvoa pienemmät painanteet eheytetään, kun taas raja-arvoa suuremmat painanteet jäävät aineistoon nieluiksi.

On huomattava, että vaikka korkeusmallin eheyttäminen pyrkii poistamaan virheet ja epätäydellisyydet alkuperäisestä datasta, se yksinkertaistaa samalla aina myös oikeita maaston muotoja. Erityisiä haasteita eheyttämiselle aiheuttavat ihmistoiminnan muodostamat esteet, kuten tiet. Toisaalta eheyttäminen on välttämätöntä, jotta korkeusmallilla pystytään mallintamaan hydrologisen virtauksen liikettä maanpinnan tasoa pitkin (Verdin & Jensen 1996, Saunders, 1999). Oleellista on tuntee tarkasti oma tutkimusalue ja suhtautua aina kriittisesti alkuperäisen aineiston muokkaamiseen.

3.2.4 Virtaussuunta-algoritmeja

D8-algoritmi on yksisuuntainen (Single Flow Direction) virtausmalli, jossa virtaus kohdistuu yhteen tiettyyn naapurisoluun (Qin ym 2007: 5). Tällainen on myös Rho8-algoritmi (Random eight-node), jonka Fairfield ja Leymarie julkaisivat vuonna 1991. Sen tavoitteena oli rikkoa D8-mallin suoraviivaisuutta käyttämällä virtaussuunnan määrittämisessä keskivirtaussuuntaa apuna. Se toteutettiin muuttamalla diagonaalien etäisyyskerroin ($\sqrt{2}$) luvulla 2-r, jossa r on tasaisesti jakautunut satunnaisluku nollan ja yhden välillä (Fairfield & Leymarie 1991). Algoritmi tuottaa Wilsson ja Gallantin mukaan (2000) aavistuksen todennukaisemman virtausverkoston kuin D8.

Yksisuuntaisia virtausmalleja on kuitenkin kritisoitu niiden ongelmista mallintaa virtauksen hajaantumista (Moussa & Chahinian 2009). Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty erilaisia MFD (Multiple-Flow-Direction) eli monivirtaussuuntamalleja, joissa virtaus voi jakaantua tarkastelusolusta useampaan kuin yhteen naapurisoluun (esim. Pilesjö & Zhou 1997, Huang & Lee 2015: 170, Qin ym. 2007: 5). Tämä tulee tarpeeseen erityisesti, kun virtauksessa tapahtuu eriytymistä. Yksisuuntaisen virtausmallin etuna on sen helppo toteutettavuus ja se toimii parhaiten yhteen samaan pisteeseen päätyvässä valumassa (Qin ym. 2007: 5).

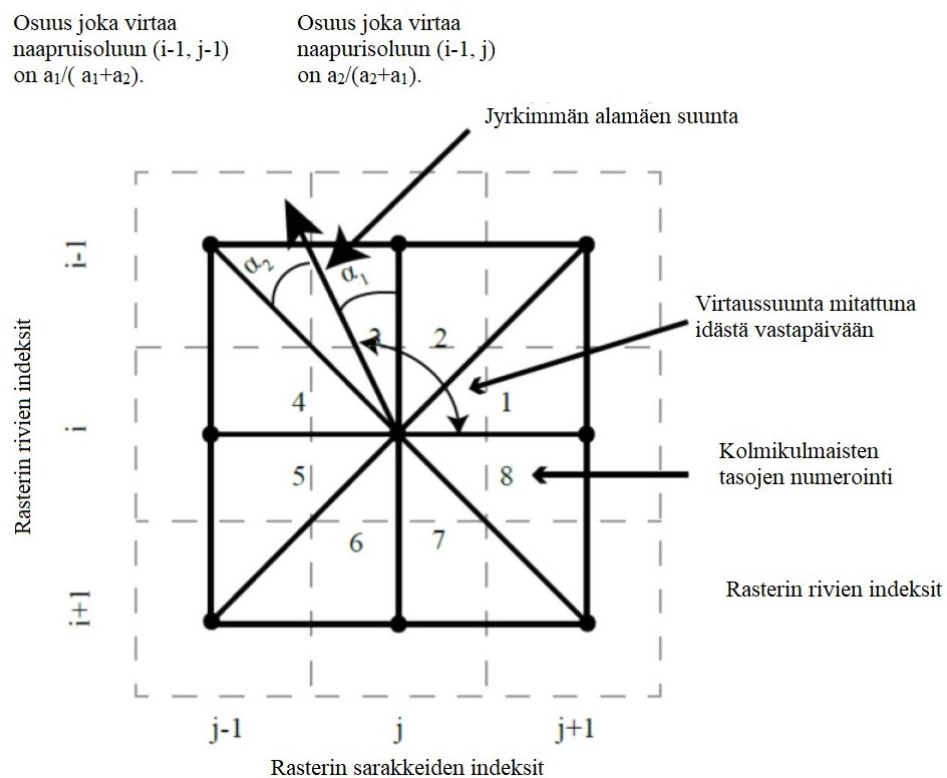
Varhaisin kehitetty monivirtaussuuntamalli on Quinnin ym. vuonna 1991 julkaisema MD8-algoritmi, joka jakaa virtaussuunnan kaikille kahdeksalle naapurisolulle, jotka ovat tarkastelusolua alempana. Se on D8- ja Rho8-algoritmien ideoista jalostettu malli, jossa virtauksen jakautumista säädellään tutkimusalueen yleisten topografisten ominaisuuksien perusteella määrittävällä painotuseksponentilla (Qin ym 2007: 7). MD8-algoritmilla virtaussuunta määritetään naapurisolulle i seuraavasti:

$$d_i = \frac{(\tan \beta_i)^f \times L_i}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^f \times L_j}$$

missä $\tan \beta$ on solun kaltevuus, f virtausjakautumisen painotuseksponentti ja L_i solumuodon kerroin, joka on pääilmansuunnille 0,5 ja diagonaalisuunnille 0,354 (Kim & Lee 2004: 1778). Eksponenttia muuttamalla saadaan algoritmi tuottamaan tutkimusalueen maastonmuotoja vastaavaa virtauksen jakautumista. Se ei kuitenkaan

sovellu kiinteän eksponenttinsa takia maastoon, joka sisältää sekä virtauksia kokoavaa että erottelevaa topografiaa (Qin ym 2007: 7). Algoritmi tuottaa kokonaisuudessaan todenmukaisemman virtausjakauman kuin D8 (Wilsson & Gallant, 2000).

Tarboton sen sijaan kehitti vuonna 1997 D^∞ algoritmin, jossa virtaussuunta esitetään jatkuvana kulmana 0 ja 2π radiaanin välillä. Algoritmi perustuu kahdeksaan kolmioon 3×3 rasteriverkostossa. Jyrkin virtaussuunta lasketaan tarkastelusolun ja sen jokaisen kahden vierekkäisen naapurisolun keskipisteen muodostaman kolmion sekä solujen korkeusarvojen avulla. Virtaussuunta määritetään alla olevan kuvan (kuva 10) osoittamalla tavalla (Tarboton 1997: 310–311). Virtaussuunnan osuessa suoraan pää- tai väli-ilmansuuntiin virtaus solusta kohdistetaan vain kyseiseen soluun. Vastaavasti näiden välille sattuessaan virtaus jaetaan kahden jyrkimmän virtaussuuntasolun kesken sen mukaan, kuinka lähellä solujen päävirtaussuunnat ovat määritettyä jyrkintä laskusuuntaa.



Kuva 10. D^∞ algoritmin virtauksenjakautumisperiaate (Koottu kirjoittajan toimesta Tarbotonin (1997: 311) sekä Salmi ym. (2013: 10) kuvista).

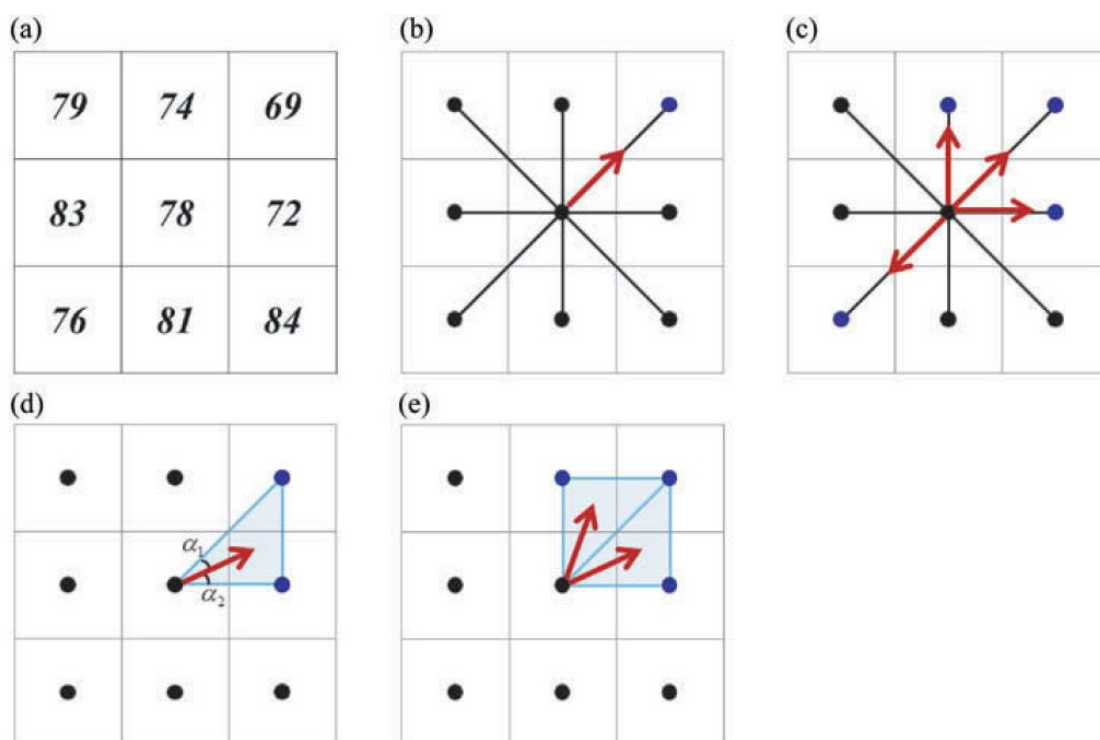
Seibert ja McGlynn julkaisivat vuonna 2007 jalostetun version Tarbotonin (1997) algoritmista. He integroivat yhteen MD8- ja D^∞ -algoritmien edut. Algoritmista käytetään pohjana Tarbotonin (1997) kehittämää 8 kolmion mallia (kuva 10). Virtaussuunnan jakautuminen määritetään MD8-algoritmin tapaan, mutta D^∞ -algoritmista johdettujen kahden jyrkimmän kolmion avulla. Algoritmista käytetään nimeä MD^∞ (Huang & Lee 2015: 172). Algoritmi tuottaa samansuuntaisia tuloksia Quinnin ym. (1991) MD8-algoritmin kanssa, mutta sillä voidaan Seibertin ja McGlynnin (2007: 8) mukaan välttää MD8-algoritmin epärealistiset virtausten leviämiset sekä parantaa Tarbotonin (1997) algoritmin rajoittunutta virtauksen hajaantumista.

Samana vuonna Qin ym. (2007) kehittivät oman MFD-algoritmin, jossa virtaus jakautuu myös kaikkiin kahdeksaan naapurisoluuun, jotka ovat tarkastelusolua alempana. Se on kehitetty versio Quinin ym. (1991) MD8- algoritmista. Algoritmi pyrkii ottamaan huomioon myös paikallisia maasto-olosuhteita, johon MD8-algoritmi ei pysty kiinteän eksponenttinsa takia. Algoritmin kaava on samankaltainen MD8 kanssa, mutta virtauksen jakautumisen painotuseksponenttia säädellään paikallisten maastonmuotojen mukaan mukautuvalla kertoimella. Eksponenttia ohjaavan kertoimen määrittäminen perustuu suurimpaan virtausjyrkkyyteen tarkasteltavissa soluissa. Tästä algoritmi on saanut myös nimensä MFD-md (Multi Flow Direction based on Maximum Downslope Gradient). Jyrkillä alueilla virtaus on usein johdonmukaista ja vahvasti suuntautunutta, mutta tasaisemmillä alueilla virtauksen jakautumisen todennäköisyys ja moninaisuus kasvavat. Tästä syystä jyrkillä alueilla MFD-md ohjaa virtauksen jyrkimmän virtaussuunnan naapurisoluuun (kuten D8), mutta maaston tasoittuessa algoritmi jakaa virtausta tasaisemmin kaikkien alapuolella sijoittuvien solujen kesken (kuten MD8). Algoritmin laskee virtaussuunnan naapurisolulle i seuraavasti:

$$d_i = \frac{(\tan \beta_i)^{f(e)} \times L_i}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^{f(e)} \times L_j}$$

Kaava on samanlainen, kuten aikaisemmin esitelty MD8-algoritmin kaava, mutta virtausjakautumisen painotuseksponentti f sisältää lisäksi paikallisia maastonmuotoja huomioivan kertoimen e .

Alla olevassa kuvassa 11 on esimerkit erilaisten virtaussuunta-algoritmien käyttäytymisestä. MFD-md puuttuu kuvasta, mutta se käyttäytyy esimerkkien b ja c yhdistelmänä.



Kuva 11. Erilaisten virtaussuunta-algoritmien käyttäytyminen: (a) korkeusmalli, (b) D8, (c) MD8, (d) D^∞ , (e) MD^∞ (Huang & Lee 2015: 170).

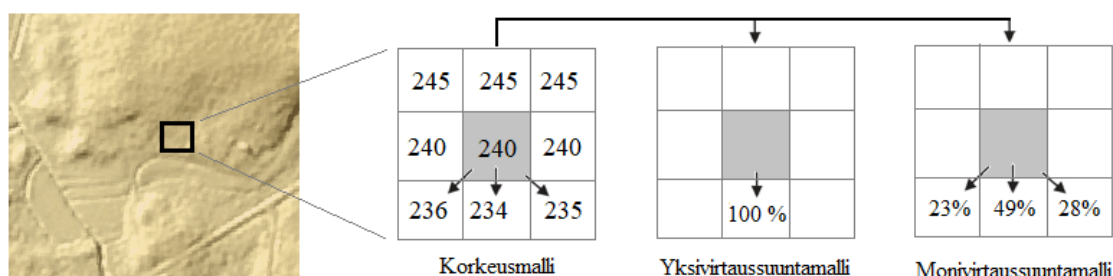
3.2.5 Valunnan kertymä

Valunnan kumuloitumisen (Flow Accumation) laskeminen on korkeusmallin eheyttämisen ja virtaussuunnan määrittämisen ohella kolmas tärkeä elementti hydrologisessa mallintamisessa. Valunnan kertymän laskemisessa määritetään valunnan kokonaiskertymä jokaiselle rasterin solulle. Kertymäarvo muodostuu sitä suuremmaksi, mitä suurempi valunta soluun kohdistuu. Jos jokaisen solun painoarvoksi oletetaan 1, niin yksisuuntaisissa virtausmalleissa solun kertymäarvo osoittaa, kuinka monen solun valunta kulkeutuu kyseiseen soluun. Prosessointisolun arvoa ei lasketa mukaan tarkasteltavan solun kertymään. Kokonaiskertymäarvoltaan nolla olevat solut ilmentävät paikallisia topografian huippuja (Tarboton ym. 1991: 84).

Yksittäiselle solulle valunnankertymä lasketaan seuraavasti:

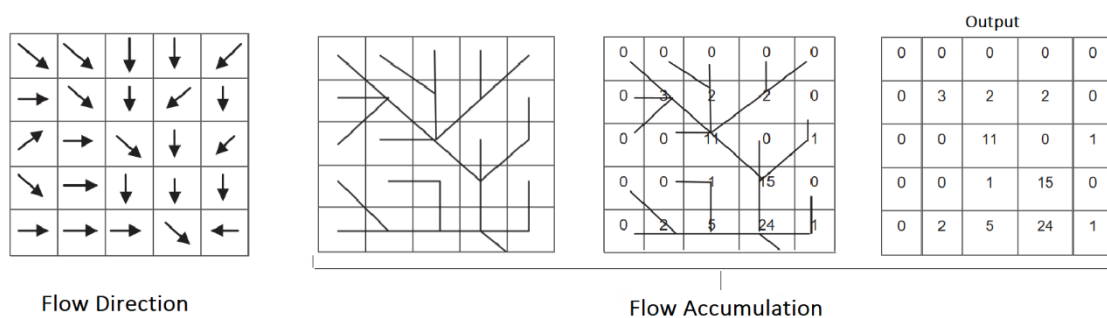
$$V_{ulos} = V_{sisään} + V_{sisäinen}$$

missä, V_{ulos} tarkoittaa solusta tulevaa virtausta, $V_{sisään}$ soluun tulevaa virtausta ja $V_{sisäinen}$ solun omaa painoarvoa valunnalle. Oletuspainoarvo soluille on 1 (Pilesjö & Zhou 1997). Valunnan kertymisen laskeminen on sidottu käytettyyn virtaussuunta-algoritmiin. Yksisuuntaisissa virtaussuuntamalleissa tarkastelusolun koko valunta kohdistuu yhteen tiettyyn soluun. Monivirtaussuuntamalleissa valunnankertymä voi jakautua useamman solun kesken, kuten kuvassa 12 on havainnollistettu (Schaüble ym. 2007: 637).



Kuva 12. Korkeusmallin solun valunnan jakautuminen yksi- ja monivirtaussuuntamallissa.

Erilaisista virtaussuunta-algoritmeista huolimatta perusperiaate kertymän määrittämisessä on sama. Kertymässä lasketaan tarkastelusolun yläpuolisten solujen kyseiseen soluun kohdistama valunnan kertymä. Valunnan suunta sekä jakautuminen määritetään virtaussuunta-algoritmeilla (Schaüble ym. 2007: 637). Edellä mainittu periaate on esitetty yksisuuntaisella virtausmallilla kuvassa 13.



Kuva 13. Valunnan kertymän muodostumisperiaate. (Muodostettu kirjoittajan toimesta Mujumdar & Nageshin (2012) teoksen kuvia hyödyntäen).

Virtauksen kertymä voidaan määrittää myös painotusrasterin avulla. Painotusrasterilla määritetään jokaiselle solulle yksilöllinen painoarvo oletusarvon 1 tilalle. Painotusrasteri voi olla esimerkiksi keskimääräistä sademäärää tietyn myrskyn aikana kuvaava rasteriaineisto. Tällöin valunnan kokonaiskertymän mallintamisessa voidaan huomioida alueelliset erot solujen arvoissa, eikä kertymä ole vain topografian mukaan määräytyvä funktio, vaan se ottaa huomioon myös sademäärän painotuksen (Schauble ym. 2007: 637).

Painotusrasteria on käytetty esimerkiksi Choin (2011) tutkimuksessa hulevesien mallintamisessa. Painorasterina tutkimuksessa toimi alueellisesti vaihteleva sademäärä. Tulva- ja hulevesimallinnukset ovatkin yleisiä valunnan kertymän hyödyntämiskohteita. Sen sijaan Liu ym. (2007) ovat hyödyntäneet painorasteria eroosionmallintamisessa. Tutkimuksessa hyödynnettiin painotusrasterina maanpeiteaineistoa, joka on vahvasti sidoksissa eroosion voimakkuuteen. Baker ym. (2006) hyödynsivät painotusrasteria tarkastellessaan rantavyöhykkeiden hyödyllisyyttä vesistöjen ravinne päästöissä. Painotusrasterina käytettiin ranta-alueiden kasvillisuuden ravinnesidontakykyä. Stichbury ym. (2011) taas tutkivat kosteusmallin muodostamista Etelämantereella, jossa painotusrasterina käytettiin lumipeitteen paksuutta.

4. TUTKIMUSAINEISTOT JA TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

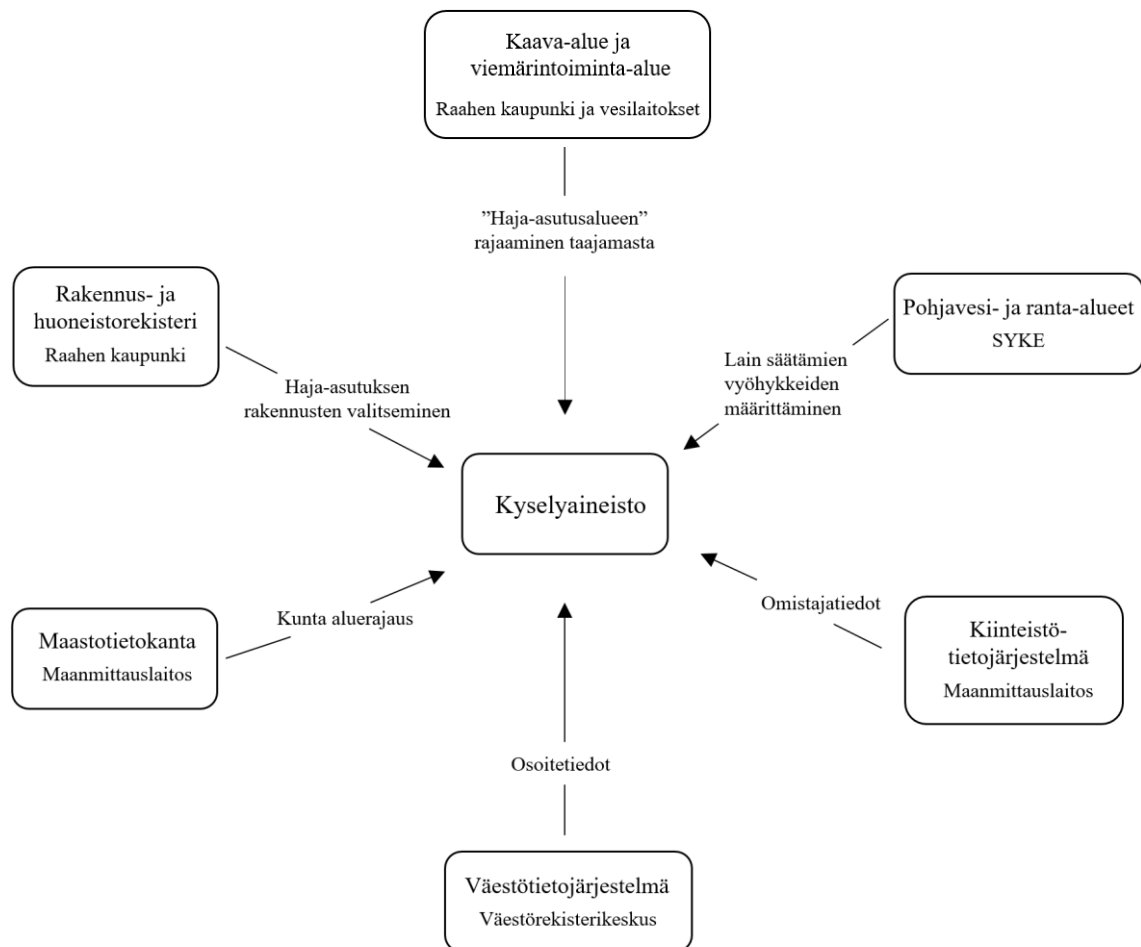
Seuraavaksi käydään läpi työn tutkimuksellinen osio. Luvussa käydään läpi tutkimuksessa käytetyt aineistot, niiden alkuperä, esikäsittely, analysointi, sekä tutkimuksen toteuttamisen eri vaiheet ja niissä esiin tulleet maininnan arvoiset asiat.

Tutkimuksen aineistokokonaisuus muodostuu pääasiassa valunnanmallinnuksen toteuttamiseen- sekä kuormitusaineiston määrittämiseen tarvittavista aineistoista. Valunnanmallinnuksen perustana toimii digitaalinen korkeusmalli DEM (Digital elevation model). Kuormitusaineisto on koottu Raahe-Siikajoen alueella toteutetusta jätevesikyselystä sekä erinäisistä avoimista ja Raahen kaupungin käytössä olevista paikkatietoaineistoista ja tietorekistereistä.

4.1 Kuormitusaineisto

4.1.1 Jätevesikysely

Toteutin Raahen kaupungin ympäristönvalvonnalle jätevesikyselyn (liite 1–2) kesällä 2019. Kyselyn tavoitteena oli luoda tilannekatsaus uuden jätevesiasetuksen siirtymäaikaa koskevien kiinteistöjen jätevesijärjestelmistä. Kyselyn toteutus lähti liikkeelle kohderyhmän määrittämisestä, joka on esitetty kuvassa 14. Itse kyselyn muodostamisessa käytettiin apuna Raahen rakennusvalvonnan vanhaa jätevesiselvityslomaketta, sekä Suomen vesisuojeilyyhdistysten liiton valmista lomakepohjaa.



Kuva 14. Kyselyaineiston kohderyhmän määrittäminen ja määrittämisessä käytetyt aineistot sekä aineiston tuottajat.

Kyselyn kohderyhmänä olivat Raahen ja Siikajoen kuntien 100 metrin rantavyöhykkeellä, sekä pohjavesialueilla olevat viemäriverkoston ulkopuoliset rakennukset. Maatalouden ja ympäristöluvanvaraisen toiminnan rakennukset jäivät kyselyn ulkopuolelle, koska ympäristönsuojelulain 154 § rajaa haja-asutuksen jätevesien koskevan vain talousvesiä eli pääasiassa asuin- ja vapaa-ajan rakennuksia. Kohderyhmän rakennusten rajaaminen on toteutettu Raahen kaupungin rakennus- ja huoneistorekisterin avulla. Aineistoa ylläpidetään siirtymäaika-alueet -kuntarekisterissä rakennusvalvonnan, kiinteistörekisterin sekä kaavoituksen ylläpitoprosessien avulla (Facta ja kuntanet -kuntarekisteri ja paikkatietoratkaisut 2019). Hallinnolliset aluerajaukset on suoritettu maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta saatavan maastotietokanta-aineiston avulla (Maastotietokanta 2019). Maanmittauslaitoksen avoimesta tiedostopalvelusta on peräisin myös karttaesityksissä käytetyt pohjakartat. Viemäriverkon ulkopuolisten rakennusten eli haja-asutuksen rajaamisessa on hyödynnetty Raahen kaupungin alueella vesilaitosten viemärin toiminta-alue karttoja ja Siikajoen alueella asemakaava-alue rajauksia. Siirtymäaika vyöhykkeiden rajaamisessa käytettiin Suomen ympäristökeskuksen tuottamia aineistoja ympäristönsuojelulain mukaisista 100 metrin rantavyöhykkeestä sekä pohjavesialueista (Hajajätevesien YSL:n mukaiset siirtymäaika-alueet 2017). Kiinteistöjen omistajatiedot ovat peräisin kiinteistötietojärjestelmästä. Kiinteistötietojärjestelmä on Maanmittauslaitoksen ja kuntien yhteistyössä ylläpitämä tietokanta, jossa tieto syntyy ja päivittyy maanmittaustoimitusten ja viranomaispäätösten kautta (Kiinteistörekisteri 2019). Kiinteistön omistajien yhteystiedot ovat hankittu väestörekisterikeskuksen rajapinnan kautta. Myös rakennuskanta-aineiston asukaslukumäärä on peräisin väestörekisterikeskuksen tiedoista. Väestörekisterikeskus ylläpitää valtakunnallista väestöntietojärjestelmää, joka toimii tietovarantona viranomaisille ja yrityksille (Väestörekisterikeskus 2019). Osalle henkilöistä oli olemassa vain osoite, muttei sijaintitietoa, joten henkilöt ovat geokoodattu osoitteen avulla aineistoon mukaan.

Kyselylomakkeella (liite 2) pyrittiin selvittämään kiinteistön ja sen rakennusten perustiedot, talousveden saantiin ja jätevedeen vaikuttavat varusteet, käymälän tyyppi sekä jätevesijärjestelmä ja siihen liittyvät muut tarvittavat tiedot. Näillä tiedoilla pystyttiin valvomaan jätevesiasetuksen toteutumista, sekä määrittämään tähän tutkimukseen kiinteistökohtaiset ravinnekuormat nykytilanteessa sekä tulevaisuudessa.

4.1.2 Kuormitusaineiston koostaminen

Kuormitusaineiston muodostaminen lähti liikkeelle tutkimusalueen eli Pattijoen valuma-alueen rajaamisesta. Valuma-alueen täydellinen määrittäminen ei kuitenkaan ole mahdollista, vaan rajaukset ovat aina todellisuutta lähenteleviä mallinnuksia. Esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen valuma-alueen rajaamiseen kehitetty VALUE-työkalu, Pattijoen kuormitus selvityksessä käytetty valuma-aluerajaus ja itse toteuttamani korkeusmalliin ja D8-algoritmiin pohjautuva valuma-aluerajaus antoivat hieman erilaisia tuloksia. Erot olivat kuitenkin marginaalisia, joten tutkimusalueeksi valikoitui kuormitus selvityksessä käytetty valuma-aluerajaus. Tällöin tutkimuksen tulokset ovat vertailukelpoisia kuormitus selvityksen tulosten kanssa.

Seuraavaksi määritettiin tutkimuskohteet eli Pattijoen valuma-alueen haja-asutus. Aineisto sisältäisi jätevesikyselystä poiketen myös siirtymäaika-alueiden ulkopuoliset rakennukset. Kuormitusaineisto on rajattu Pattijoen valuma-alueella muuten jätevesikyselyn rajauksen mukaisesti (kuva 14), mutta 100 metrin rantavyöhyke- ja pohjavesialuerajaus on jätetty tekemättä. Tällöin tutkimusalue kattaa koko tutkimusalueen haja-asutuksen.

Kuormituksen määrä saatiin määritettyä tarkastelemalla seuraavia rakennusten kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä: asukasmäärä, käyttöaste, varustelutaso, käymälätyyppi sekä jätevesien käsittelyjärjestelmä (Heino 2017: 5). Jätevesikyselyn vastaukset kattoivat noin 20 % tutkimusalueen rakennuksista. Vastausten perusteella pystyttiin muodostamaan melko tarkka käsitys kyseisten rakennuksen jätevesikuormitukseen vaikuttavien tekijöiden nykytilasta. Muiden rakennusten kuormituksen määrän arvioimisessa hyödynnettiin rakennustietokannan tietoja rakennusten käyttötarkoituksesta, rakentamisvuodesta ja asukasmäärästä seuraavaksi esitetyllä tavalla.

Koko jätevesikyselyn vastausprosentti oli 60 %. Näiden 1450 vastauksen perusteella paljastui, että jätevesien käsittelyjärjestelmän uusiminen oli tekemättä vielä suuressa osassa ennen vuotta 2004 rakennetuista siirtymäalueiden rakennuksista, vaikka lain siirtymäaika oli jo lähes umpeutunut. Tämän ja ympäristönvalvonnassa tekemäni työni perusteella pystyttiin oletamaan, että remontti on tekemättä myös kyselyn ulkopuolelle jääneissä ennen 2004 rakennetuissa rakennuksissa. Näillä alueilla

jätevesijärjestelmän remonttia ei ole edes vaadittu tekemään. Aineistosta kävi lisäksi ilmi, että ennen 2004 vuotta rakennettujen asuinrakennusten ja vapaa-ajan rakennusten käymälät ja käsittelyjärjestelmät olivat rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan hyvin samankaltaisia. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta kaikissa asuinrakennuksissa oli käytössä vesikäymälä sekä vanhan vesilain mukainen puhdistusjärjestelmä. Lähes kaikissa vapaa-ajan asunnoissa oli käytössä kuiva- tai kompostikäymälä. Koko aineiston vapaa-ajan asuntojen vesikalusteiden määrässä ja käsittelyjärjestelmissä oli vaihtelua, mutta tutkimusalueen vapaa-ajanasuntojen tulokset olivat varustelutason osalta yhteneväisiä. Tutkimusalueen vapaa-ajan asunnot olivat kantoveden varaisia, sillä alueelle sijoittuneet vapaa-ajan asunnot olivat pitkälti yksinäisiä erämökkejä.

Näiden tietojen avulla siirtymäaika-alueiden ulkopuolisille ennen vuotta 2004 rakennetuille asuinrakennuksille oli mahdollista olettaa käymälätyypiksi vesikäymälä ja käsittelyjärjestelmäksi esisaostuksella olevan heikkotehoinen maaperäkäsittely. Vapaa-ajan rakennukset oletettiin jätevesijärjestelmättömiksi, joissa käymälätyyppinä on kuivakäymälä. Kantoveden varaisessa vapaa-ajan asunnossa ei ole tarvinnut erillistä käsittelyjärjestelmää. Kyselyn ulkopuolisille rakennuksille täytyi määrittää lisäksi käyttöaste. Vakituksia asukkaita sisältävien asuinrakennusten käyttöasteeksi oletettiin 12 kk vuodessa ja vapaa-ajan asunnoille koko kyselyaineiston vapaa-ajan asuntojen käyttöasteen keskiarvo eli noin 3,5 kk vuodessa. Jos asuinrakennuksen käyttötarkoitus oli muu kuin vakituinen asuminen oletettiin rakennuksen käyttöasteeksi myös 3,5 kk vuodessa. Kaikille vuoden 2004 jälkeen rakennetuille rakennuksille sekä luvitetun jätevesiremontin tehneille tai sitä tekemässä oleville rakennuksille oletettiin uuden jätevesilainsäädännön mukainen jätevesijärjestelmä. Lainsäädännön vuoksi vuodesta 2004 lähtien toteutetut käsittelyjärjestelmät ovat nykyvaatimusten mukaisia. Aineiston muodostuksessa oletettuja tietoja tarkistettiin satunnaisotoksella jätevesikyselyn ulkopuolisten rakennusten eikä niissä ilmennyt merkityksellisiä puutteita.

4.1.2 Rakennuskohtaisen kuormituksen määrittäminen

Jätevesistä vesistöihin päätyvät orgaaninen aines eli hiili (C) sekä typpi (N) ja fosfori (P), ovat olleet merkittävässä roolissa vesistöjen rehevöitymisessä (Takanobu 1991). Jätevesien kuormitusta mitataan perinteisesti näiden muuttujien avulla (Eriksson ym. 2002). Orgaanisen aineen määrää mitataan usein biologisen- (BOD₇) ja kemiallisen hapenkulutuksen (COD) avulla. Typeä ja fosforia tarkastellaan sen sijaan niiden kokonaismäärien avulla (Vilpas ym. 2005). Työn kuormitusaineistoon valikoitui lopulta mukaan fosfori ja typpi, sillä ne ovat kuormituselvityksissä yleisesti käytettyjä ja niihin oli saatavilla vertailuaineistoa tutkimusalueeltani.

Rakennusten fosfori- ja typpipäästöjen määrän arvioinnissa käytettiin pohjana ympäristösuojelulain 154 a §:ssä määriteltyjä haja-asutuksen ominaiskuormituslukuja. Ominaiskuormitusluvut tarkoittavat haja-asutuksen käsittelemättömien talousjätevesien kuormitusta asukasta kohden grammoina vuorokaudessa (taulukko 1). Määritettyihin kuormituslukuihin päästään, kun rakennuksessa on tavanomainen varustetaso, vesikäymälä on käytössä ja vedenkulutus on keskimääräistä. Ympäristösuojelulakiin määritetyt kuormitusluvut tukeutuvat useisiin koti- ja ulkomaisiin tutkimuksiin sekä selvityksiin (Kaloinen & Santala 2009).

Taulukko 1. Haja-asutuksen ositetut- sekä kokonaiskuormitusluvut (jätevesiasetus 157/2017).

Kuormituksen alkuperä	Kokonaisfosfori P		Kokonaistyppi N	
	g/hlö/vrk	%	g/hlö/vrk	%
uloste	0,6	30	1,5	10
virtsa	1,2	50	11,5	80
muu	0,4	20	1	10
yhteensä	2,2	100	14	100

Vesikäymälän jätevesistä syntyvä kuormitus on sidoksissa pitkälti asunnon henkilömäärään sekä käyttöasteeseen, sillä käymäläjätteen määrä henkilöä kohden voidaan olettaa vakioksi. Sen sijaan harmaiden jätevesien eli käymäläjätteitä sisältämättömien jätevesien ravinnekuormaa on hankalampi arvioida. Harmaiden jätevesien kuormitus liittyy tiiviimmin käyttöasteen ja asukasmäärän lisäksi myös asuntojen varustelutasoon, sillä ravinnekuorma muodostuu mm. vesikalusteiden käyttöön

liittyvistä kemikaaleista, rasvasta sekä helposti hajoavasta orgaanisesta aineesta (Ridderstolpe 2004 & Eriksson ym 2002).

Eriksson ym. (2002) ovat koonneet kansainvälistä tutkimuksia varustelutasojen vaikutuksesta ravinnekuormitukseen. Jätevesistä mitatut kuormituspitoisuudet vaihtelevat eri talouksien ja eri tutkimusten välillä, koska esimerkiksi vesikalusteiden ominaisuudet, elämäntyyli ja kemiallisten kotitaloustuotteiden käyttö ovat hyvin vaihtelevia. Yksittäisen varustetason suoraa vaikutusta kokonaiskuormitukseen on lähes mahdotonta johtaa. Myös jätevesilainsäädäntö ottaa kantaa varustelutasoon vain hyvin yleisellä tasolla. Puhdistusvaatimuksia voidaan tulkita väljemmin harmaiden vesien osalta, jos jätevesien vaikutus voidaan arvioida vähäiseksi varustelutasoon, asumismäärän ja vedenkäytön avulla (Heino 2017: 11). Tämän vuoksi tutkimuksessa luokiteltiin harmaat jätevedet varustelutasoon mukaan jätevesilainsäädäntöä mukaillen vain kahteen eri kuormitusluokkaan: kantoveden varaiset rakennukset ja normaali varustuksella olevat rakennukset. Lisäksi lähes kaikki tutkimusalueen rakennukset olivat kyselyyn mukaan joko kantovedenvaraisia vapaa-ajan asuntoja tai asuinrakennuksia, joten luokittelu oli sen puolesta mielekäs. Jokaiselle haja-asutuksen rakennukselle laskettiin oma rakennuskohtainen kuormitus alapuolella esitetyn kaavan mukaisesti.

$$\text{Kokonaiskuormitus} = \text{käyttöaste} \times \text{varustelutasokerroin} \times \text{asukasmäärä} \times \text{vuorokausikuormitus} \times \text{jätevesijärjestelmän puhdistusteho}$$

Käyttöastekerroin määräytyi joko kyselyssä ilmoitetun rakennuksen käyttömäärän tai aikaisemmin mainitulla tavalla rakennustyyppin mukaan siten, että arvo asettui 1 ja 0 välille (1 = 12 kk). Varustelutasokerroimeksi asetettiin normaalin varustelutasoon omaaville rakennuksille 1 ja kantoveden varaisille rakennuksille 0.5, sillä hyvin vähäiset harmaat jätevedet voidaan olettaa kansainvälisen tutkimusten mukaan (Eriksson ym. 2002) normaalia varustelutasoa vähäravinteisemmaksi. Rakennuskohtainen kuormitus kerrottiin rakennuksen asukasmäärällä. Asukasmäärä saatiin vakituista asutusta sisältävien asuinrakennusten ja jätevesikyselyn vapaa-ajan asuntojen osalta suoraan aineistosta. Muut kyselyn ulkopuoliset rakennukset saivat oletetuksi käyttäjämääräksi koko aineiston keskiarvon eli 2,5 henkilöä. Vuorokausikuormituksen määrä johdettiin

jätevesilainsäädännön ominaiskuormituskertoimien ja rakennuksen käymälätyypin avulla. Vesikäymälällisten rakennusten päiväkohtainen fosforikuormitus oli 2,2 g/vrk ja typpikuormitus 14 g/vrk. Pelkkiä harmaita jätevesiä tuottavien rakennusten päiväkohtainen fosforikuormitus oli sen sijaan 0,4 g/vrk ja typpikuormitus 1 g/vrk. Ennen vuotta 2004 rakennettujen jätevesijärjestelmien puhdistustehoa arvioitiin aineiston avulla. Useimmilla tutkimusalueen vanhemmilla rakennuksilla oli käytössä yksi tai kaksiosainen esisaostus sekä jonkinlainen maaperäkäsittely tai kivipesä. Aineistossa oli myös niitä rakennuksia, joiden jätevedet laskettiin saostuskaivokäsittelyn jälkeen suoraan vesistöön. Vanhojen maaperäkäsittelyjärjestelmien puhdistustehoa on hyvin vaikea määrittää. Heino (2017: 4) mukaan pelkkä saostuskaivokäsittely puhdistaa jätevesien fosforikuormituksesta 10 % ja typpikuormituksesta ei ollenkaan. Vanhat käsittelyjärjestelmät eivät täytä nykyisen asetuksen mukaisia määritelmiä ja lisäksi niiden puhdistusteho on usein laskenut vuosikymmenien aikana. Tutkimuksessa päädyttiin lopulta asettamaan vanhojen käsittelyjärjestelmien puhdistustehoksi saostuskaivokäsittelyn tehon ja noin kolmasosan toimivan maaperäkäsittelyn puhdistustehosta. Fosforin osalta puhdistusteho oli 25 % ja typen osalta 10 %.

Vuoden 2004 jälkeen rakennettujen ja uusittujen jätevesijärjestelmien puhdistustehoksi asetettiin jätevesilainsäädännön vaatima puhdistusteho. Vaatimukset ovat käymäläjätettä sisältävän jäteveden fosforille 70 % ja typelle 30 %, kun taas pelkkien harmaiden jätevesien fosfori- ja typpikuormitukselle ei ole asetettu puhdistusvaatimuksia. Niin maaperäkäsittelyllä kuin erilaisilla pienpuhdistamoilla päästään vaadittuihin puhdistusvaatimuksiin (esim. Tuhkanen ym. 2005, Vilpas ym. 2005, Särkelä & Lahti 2013). Käsittelymenetelmänä käytetään paikoittain myös umpisäiliötä, jolloin jätevedet kuljetetaan muualle käsiteltäväksi. Umpisäiliön jätevesistä ei kohdistu kuormitusta kyseiselle kiinteistölle. Umpisäiliötä käyttävien rakennusten puhdistustehoksi oletettiin 100 %. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi lähes kaikki pohjavesialueella sijaitsevat nykyisen jätevesiasetuksen mukaiset käsittelyjärjestelmät.

Rakennuskohtaiset ravinnekuormat määritettiin kolmessa eri tilanteessa; vanhan vesilain mukaisessa, tämänhetkisessä sekä uuden jätevesiasetuksen toteutumisen jälkeisessä tilanteessa. Vanhan vesilain mukaisessa skenaariossa kaikkien järjestelmien puhdistustehoksi oletettiin aikaisemmin vanhoille järjestelmille arvioitu puhdistusteho. Nykyhetken tilanne määritettiin hyödyntämällä tutkimuksen oheisaineistoja ja

kyselyvastauksia. Jätevesiasetuksen jälkeisessä tilanteessa kaikki rakennukset asetettiin täyttämään nykyisen jätevesiasetuksen vaatimukset.

Rakennuskohtaisissa kuormitusluvuissa huomioitiin lisäksi rakennuksen etäisyysvaikutuksen vesistöihin. Mallinuksessa oli käytettävissä vain yksi painotusrasteri, joten kaikki kuormitukseen vaikuttava tieto oli sulautettava samaan aineistoon. Etäisyysvaikutuksen huomioiminen toteutettiin ravinnekuormitusmalli VEMALA:ssa käytetyllä tavalla. Jokaiselle rakennukselle määritettiin etäisyysarvo (metreinä) lähimpään SYKE:n (Suomen ympäristökeskus) vesistöksi luokittelemaan vesistön uomaan. Tämän jälkeen huomioin etäisyysvaikutuksen kokonaiskuormituksessa seuraavilla kertoimilla: fosfori $\exp(-0,0015 \times \text{etäisyys metreinä})$, typpi $\exp(-0,0008 \times \text{etäisyys metreinä})$ (Huttunen 2020).

4.2 Digitaalinen korkeusmalli

Mallintamisen pohja-aineistona toimiva hilamuotoinen digitaalinen korkeusmalli on ladattu Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta. Korkeusmalliksi kutsutaan maanpinnan topografian numeerista esitystä, joka sisältää pinnanmuotoja kuvaavan korkeuspisteiden joukon (Mujumdar & Nagesh 2012: 124). Suomessa tarkin saatavilla oleva korkeusmalli on ilmalaserkeilaukseen pohjautuva KM2 (2 metrin hila), joka on tuotettu vuosien 2008 – 2020 aikana (Maanmittauslaitos 2016 & Paituli 2020). Korkeusmalli muodostetaan laserkeilauksen avulla tuotetusta pistepilvestä. Mallin muodostaminen tapahtuu interpoloimalla keilauksen havaintoarvot hilan arvopisteisiin, jotka yhdessä muodostavat tasavälisen verkon. Maanmittauslaitoksen korkeusmalli on esitetty tietokoneohjelmiin sopivassa rasterimuodossa eli tasasivuisten neliöiden muodostamana verkkona (Maa ja metsätalous ministeriö 2006). Ruutukoko on aineistossani 2 m x 2 m. Pistepilven tiheys on vähintään 0,5 pistettä neliömetrillä. Korkeustarkkuus tutkimusalueella on keskimäärin 0,3 metriä. KM2 kuvaa paljasta maanpintaa, johon eivät kuulu irtonaiset geologiset kohteet (esim. siirtolohkareet), ihmisperäiset ei-pysyvät pinnanmuodot (esim. väliaikaiset maakasat), eivätkä ihmisten luomat rakenteet (esim. talot ja sillat) (Maanmittauslaitos 2016).

Korkeusmallia analysoimalla saadaan selville hydrologiaa määritteleviä maanpinnan ominaisuuksia (esim. Jenson & Domingue 1988:1593, Kemp 2008: 107,

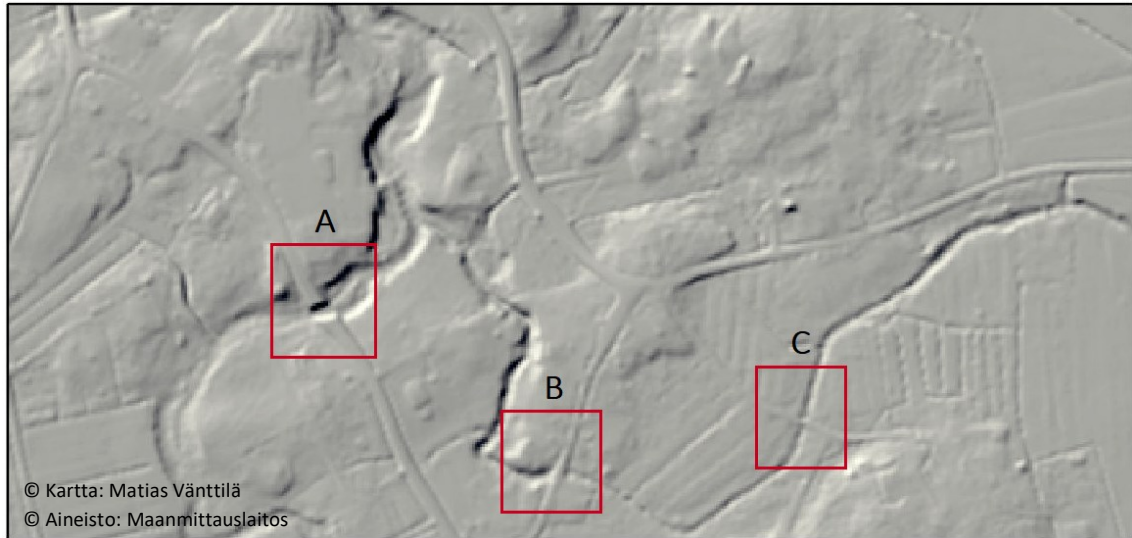
Mujumdar & Nagesh 2012: 124). Sitä käytetään erityisen paljon valuma-alueiden ja virtausreittien mallinnuksessa, vesistö- ja tulvaennusteiden mallinnuksessa sekä eroosio- ja ravinnehuuhtoumamallinnuksessa (Maa ja metsätalous ministeriö 2006, Mujumdar & Nagesh 2012: 124, Maune 2007). Maantieteissä korkeusmallilla viitataan yleensä myös hilamuotoiseen rasteriaineistoon. Siinä jokaiselle säännölliselle ruudulle eli solulle on määritetty korkeus suhteessa tiettyyn tasoon (Kemp 2008: 107, Galati 2006: 158). Maanmittauslaitoksen aineistossa nollatasoksi on asetettu keskimerenpinnan korkeus ja luvut ilmoitetaan N2000-korkeusjärjestelmässä. Keskimerenpinta on tarkoituksenmukainen vertailutaso erityisesti vesistönmallinnuksessa, sillä korkeus on veden energiatason mitta ja merenpinnankorkeutta voidaan pitää veden kulkeutumisen nollatasona (Maa ja metsätalous ministeriö 2006).

4.3 Kuormitusmallinnuksen toteutus

Tutkimusmenetelmät kuormitusmallinnuksen toteuttamiseksi ovat syntyneet työn edetessä kehitysprosessina. Painotusrasterin avulla onnistuttiin integroimaan kuormitusaineisto osaksi valunnanmallinnusta. Tässä osiossa pyritään tarkastelemaan kriittisesti menetelmien toimivuutta ja etsimään niiden ongelmakohtia, jotta mallinnus olisi kokonaisuutena mielekäs.

4.3.1 Korkeusmallin esikäsittely

Varsinaisessa kuormitusmallinnuksessa lähdettiin liikkeelle mallinnuksen pohja-aineiston eli korkeusmallin ominaisuuksien tutkimisesta. Korkeusmalli käyttökohteet ovat moninaisia, joten aineisto saattaa tarvita tapauskohtaista esikäsittelyä (Kemp 2008: 107). Tämä havaittiin myös tässä tutkimuksessa, kun tarkkailtiin korkeusmallin käyttäytymisestä tutkimusalueen vesistöuomissa. Kuvassa 15 on havainnollistettu kuinka Pattijoen pääuoman ylittävät sillat (A) olivat puhkaistu auki korkeusmalliin, mutta sivu-uomiaylittäviä siltoja (B ja C) ei ollut aukaistu.

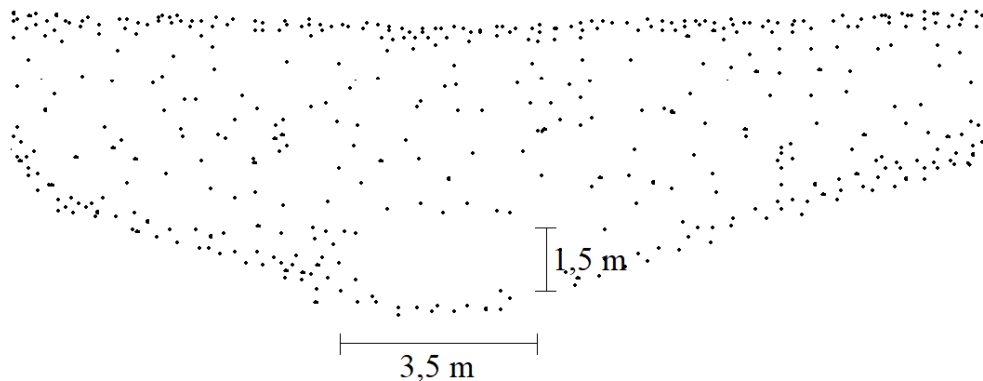


Kuva 15. Esimerkkikohteet korkeusmallissa erikokoisten vesiuomien ylittävistä silloista.

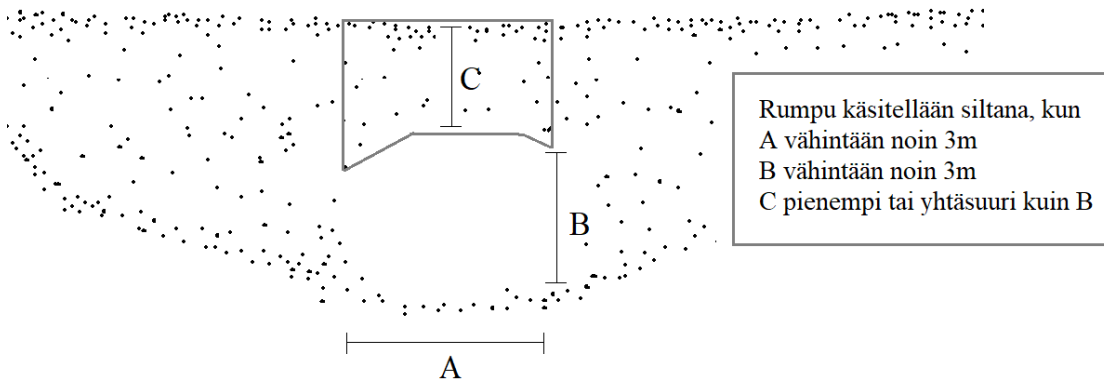
Asiaan haettiin selvyyttä aineiston tuottajalta Maanmittauslaitokselta, josta johtava asiantuntija Olli Sirkiä avasi asiaa: ”Siltojen ja siltaluonteisten kohteiden kohdalla korkeusmalli on tai ainakin sen pitäisi olla puhkaistu keilaushetken mukaisen vedenpinnan tai alla olevan maanpinnan korkeudelle. Liian ahtaita läpäisyjä lukuun ottamatta veden pitäisi päästä virtaamaan korkeusmallilla siellä missä maastossakin”. Christian Koski samalta laitokselta välitti vielä tarkentavaa tietoa, että asiassa on otettava huomioon myös se, että korkeusmalli KM2 ensisijainen käyttöskenaario on ollut tulvamallinnus. Silta/rumpukannet ovat luokiteltu manuaalisesti pistepilveen ja kyseinen luokka on jätetty pois, kun varsinainen hilamuotoinen korkeusmalli on laskettu. Tästä syystä pienet sivu-uomat on jäänyt aukaisematta.

Rumpu on käsitelty siltana, kun rummun leveys ja korkeus ovat vähintään n. 3 m ja rummun yläpuolisen maakerroksen paksuus on pienempi tai yhtä suuri kuin rummun korkeus. Aukaisun periaatteet on esitetty kuvassa 16. Oksanen ja Sarjakoski (2005) muistuttavatkin artikkelissaan, että korkeusmallin tuotantotapa vaikuttaa aina korkeustietoon ja sen myötä myös niistä tehtävien jatkoanalyysien tuloksiin.

Esimerkki ei aukaistusta siltarummusta



Esimerkki aukaistusta siltarummusta



Kuva 16. Linjaus KM2 rumpujen puhkaisusta (Koottu kirjoittajan toimesta Maanmittauslaitoksen siltaproblematiikkaa PowerPoint-esityksestä).

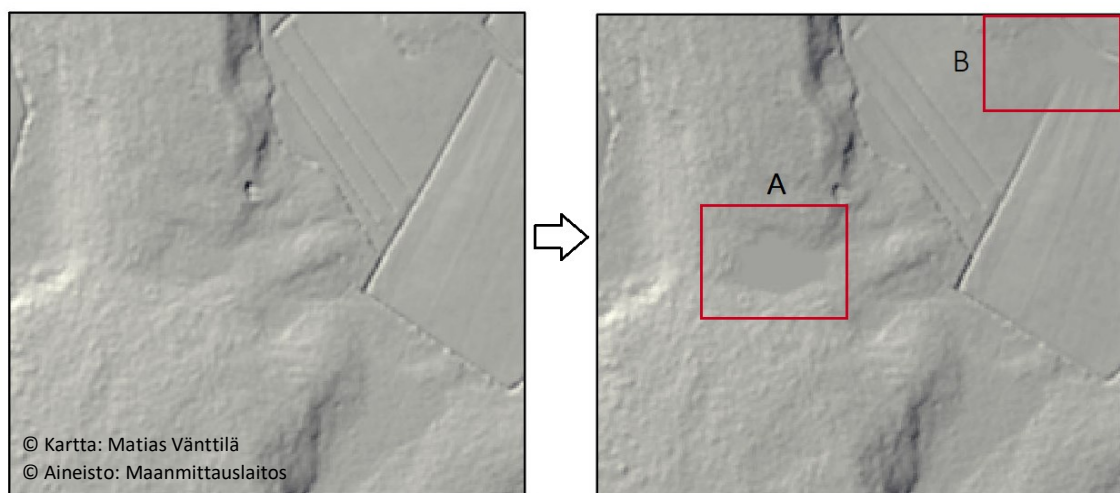
Tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä veden valuntaa tulvatilanteessa, joten pienempienkin rumpujen voidaan olettaa selviytyvän uomien vesimassojen kuljettamisessa normaalissa virtaamatilanteessa. Tästä syystä tutkimuksessa puhkaistiin myös Pattijoen sivu-uomien sillat korkeusmalliin. Sivuuomat ovat yhtenäisinä vektoreina myös maanmittauslaitoksen maastotietokanta aineistossa, joten uomat ovat erittäin suurella todennäköisyydellä yhtenäisiä. Sivuuomia pienemmät ojat jätettiin kuitenkin aukaisematta, koska korkeusmallista ei saa täyttä varmuutta pienempien ojien ja ojarumpujen sijainneista. Puhkaisu tapahtui seuraavasti:

- 1) Luodaan vektorit Pattijoen sivu-uomia läpäisevien siltarumpujen kohdalle.
- 2) Muutetaan vektorit korkeusmalliaineiston mukaiseksi rasteriaineistoksi.
- 3) Suoritetaan Raster Calculatorilla seuraavan lausekkeen siltarumpujen aukaisemiseksi: `Con(IsNull("siltarumpu_rasteri"), "DEM_rasteri", 0)`

Lauseke muuttaa korkeusmallissa siltarumpujen kohdalla olevien solujen arvot nollassi. Toimenpide suoritetaan ennen korkeusmallin eheyttämistä, sillä eheyttäminen täyttää siltojen polttamisessa syntyneiden painanteiden korkeusarvot lähimmän purkupisteen eli uoman pohjan mukaiselle tasolle.

4.3.3 Korkeusmallin eheyttäminen

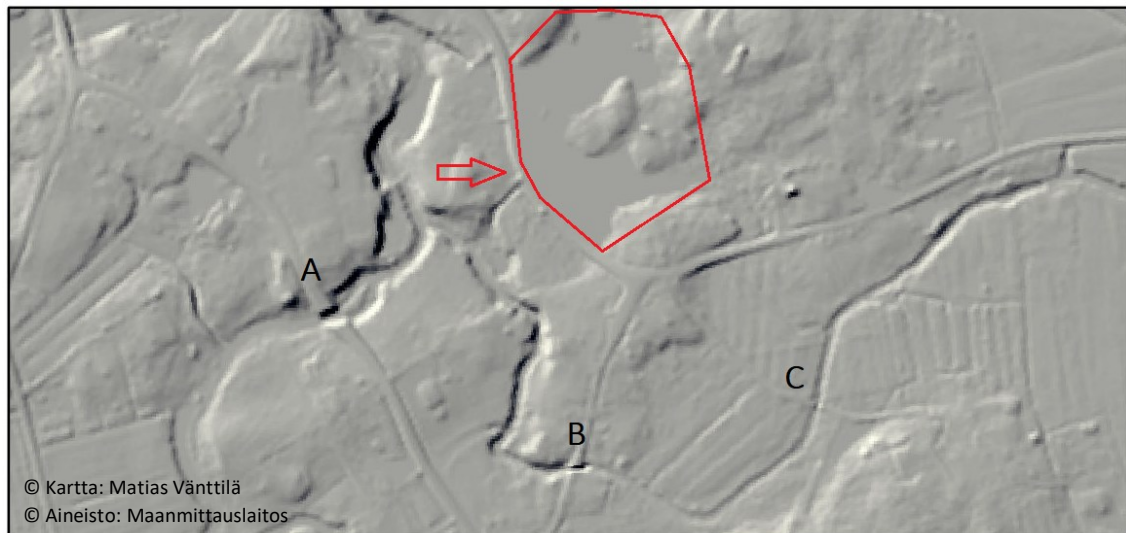
Korkeusmallin eheyttäminen tapahtuu ArcGIS:ssa Fill-työkalulla. Työkalu täyttää korkeusmallin painanteet osiossa 3.2.3 *Korkeusmallin eheyttäminen* esitetyllä tavalla. Alla olevassa kuvassa 17 on esitetty alkuperäisen korkeusmallin luonnollisia painanteita ja niiden käyttäytyminen tulosrasterissa.



Kuva 17. Korkeusmallissa esiintyviä painanteita, sekä niiden käyttäytyminen rasterin eheyttämisessä.

Ruudussa A on harjanteiden väliin jäävä painanne, joka korkeusmallin eheyttämisessä on täyttynyt koilliseen avautuvan solan purkupisteen tasoon. Vaikka eheyttäminen yksinkertaistaa harjanteiden väliin jäänyttä painannetta, niin virtaus kyetään mallintamaan eheytyksen jälkeen oikeaan suuntaan. Ruudussa B on muutama pienempi painanne sekä ojan pohja, joista virtausta ei ole myöskään määritettävissä. Tästä syystä myös nämä painanteet ovat täyttyneet ympärillä olevan maaston mukaan niin, että niihin kohdistuvalle virtaukselle pystytään määrittämään kulkureitti eteenpäin.

Suurin osa aineiston isommista painanteista syntyi silti ihmistoiminnan aiheuttamien kohteiden ympärille, kuten esimerkiksi teiden tai junaradan läheisyyteen. Tällaisissa rakennelmissa sijaitsee usein esteen alittava pienempi ojarumpu. Alla olevassa kuvassa 18 on rajattu punaisella täyttynyt painanne, joka luultavasti virtaa todellisuudessa nuolen osoittamasta kohdasta tien läpi ojarumpua pitkin. Tällaiset ongelmakohdat eivät kuitenkaan aina aiheuta vääristymää valuntaan, koska esimerkiksi alla olevan kuvan painanteen virtaus kulkeutuu lopulta tien yli lähes samasta kohtaa, mistä todennäköinen rumpu kulkee. Kuvasta on myös nähtävissä jo korkeusmallin esikäsittelyvaiheessa esitetyt kohdat A, B ja C, joissa siltojen puhkaisu on ehkäissyt painanteen syntymistä pää- ja sivu-uomien siltojen yläpuolelle.



Kuva 18. Korkeusmallissa esiintyviä siltoja/ojarumpuja, sekä niiden käyttäytyminen rasterin eheyttämisessä.

4.3.4 Virtaussuunnan määrittäminen

Virtaussuunnan määrittäminen tapahtuu ArcGIS:ssa Flow Direction-työkalulla. Työkalu määrittää rasterin soluille virtaussuunnan osioiden 3.2.2 *Virtaussuunta mallintamisen perustana* ja 3.2.4 *Virtaussuunta-algoritmeja* mukaisesti. ArcGIS:n valunnamallinnuksessa on valittavissa D8-algoritmin lisäksi MFD-md (MFD) virtaussuuntamalli sekä D^∞ (DINF) monivirtaussuunta algoritmi (ArcGIS Pro 2019). Vvirtaussuunnan määrittäminen toteutettiin kaikilla kolmella virtaussuunta-algoritmilla,

jotta pystyttiin tarkastelemaan eri algoritmien vaikutusta mallituksen lopputulokseen. D8-algoritmi antoi rasterin soluille arvoja 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ja 128 eli pää- ja välisuuntiin suoraan osoittavia arvoja. Käytetyssä korkeusmallissa solujen korkeusarvot ovat annettu liukulukuna, joten yhtä suuria korkeusarvoja ei ole ja virtauskombinaatioita ei näin pääse syntymään. MFD-algoritmin tulorasteri sisälsi sen sijaan arvoja 0–255, koska sen tulorasterissa ovat mukana kahdeksansuuntaisen virtaussuuntamallin suoria ja yhteisvaikutuksesta syntyviä virtaussuuntia. DINF-algoritmin tulorasteri taas sisälsi arvoja 0 ja 360 väliltä, sillä algoritmi määrittelee virtaussuunnan liukulukuna vastapäivään kiertäen 0 ja 360 asteen väliltä. 0 ja 360 osoittavat suoraan itään (ArcGIS Pro 2019).

4.3.5 Painotusrasteri ja kuormituksen kertymä

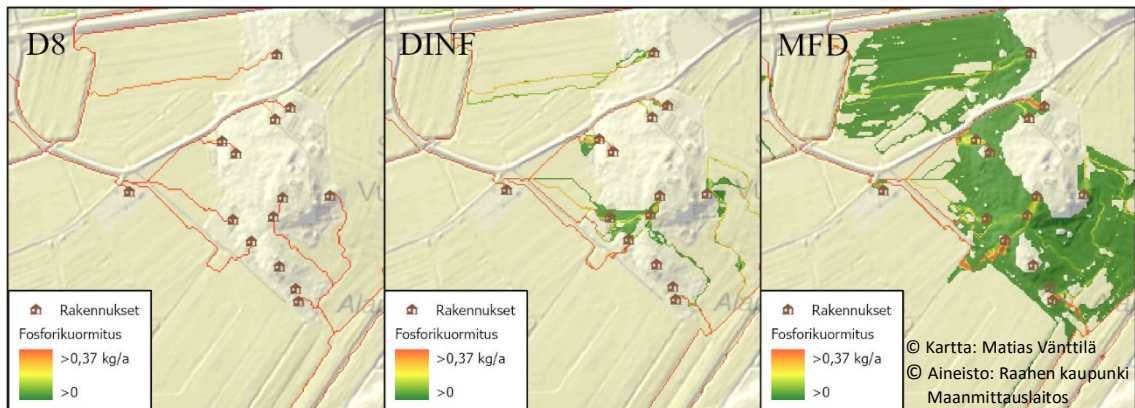
Virtaussuuntamallin ja kuormitusaineiston yhdistäminen tapahtui painotusrasterin avulla. Painotusrasterilla määritetään jokaiselle solulle yksilöllinen painoarvo oletusarvon 1 tilalle, kuten osiossa 3.2.5 *Valunnan kertymä* on esitelty. Painoarvot asetettiin aineiston rakennusten kohdalla oleville soluille, sillä ne toimivat kuormituslähteinä. Rakennusten solujen sijainnit on määritetty rakennustietokannan sijaintitietojen avulla. Tämä tapahtui muuttamalla rakennusten sijainnit korkeusmallin mukaisiksi soluiksi Point to Raster -työkalulla. Rakennuksia sisältämättömille soluille ei annettu painoarvoa. Painoarvon suuruus taas määräytyi aineiston kuormitusarvojen mukaisiksi. Käsittelyä varten tehtiin 6 erillistä painotusrasteria; fosfori- ja typpikuormituksesta nykytilanteessa sekä ennen ja jälkeen jätevesiasetuksen. Kuormitusmallinnus toteutettiin kaikilla käytössä olevilla kolmella virtaussuunta-algoritmeilla.

5. MALLINNUKSEN TULOKSET

Tässä osiossa käydään läpi mallinnuksen tulokset, jotka vastaavat tutkimukselle asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Osion alkupuolella tarkastellaan tuloksia virtaussuunta-algoritmien käyttäytymisestä sekä vaikutuksista mallinnukseen. Tämän jälkeen käydään läpi jätevesiasetuksen ja valunnamallinnuksen kuormitustulokset.

5.1 Algoritmien yleistä käyttäytymistä

Alla olevassa kuvassa (kuva 19) on havainnollistettu tutkimuksessa käytettyjen algoritmien yleistä käyttäytymistä valunnamallinnuksessa.



Kuva 19. Esimerkki D8-, DINF- ja MFD algoritmien käyttäytymisestä valunnamallinnuksessa.

Yksisuuntainen virtausmalli D8 hakeutuu nimensä mukaisesti yhteen jyrkimpään virtausreittiin, jota pitkin yksittäisten rakennusten koko kuormitus hakeutuu kohti isompaa vesiuomaa. Uomien yhdistyessä niiden kuormitukset kumuloituvat yhteen.

Sen sijaan DINF ja MFD monivirtaussuunta-algoritmeina kykenevät hajauttamaan kuormitusta, jolloin valunta hakeutuu laajemmalle alueelle etenkin kuormituslähteiden läheisyydessä. Virtauksen jakautumisen vuoksi yksittäisten rakennusten osittaiskuormitukset voivat lähteä kulkemaan hyvin eri suuntiin. Kyseisen kuvan esimerkissä rakennukset sijaitsevat paikallisella kohoumalla, joten erityisesti lähellä huippuja sijaitsevien rakennusten kuormituksessa on jakautumista. Kohouma ja sen huipun läheisyys lisäävät eri suuntiin avautuvien mahdollisten virtausreittien määrää. Tämä mahdollistaa virtausten jakautumisen laajalle sektorille monivirtaussuunta-

algoritmeilla. MFD-algoritmi jakautuu voimakkaimmin ja virtauksen hajaantumista tapahtuu kohoumien lisäksi myös tasaisemmillä alueilla, kuten esimerkkikuvan yläosassa sijaitsevalla pellolla. MFD-algoritmin painotuseksponentti lisää algoritmin virtausten jakautumista tasaisilla alueilla. Toisaalta suurin osa MFD-algoritmin jakautuvasta kuormituksesta on arvoltaan hyvin pientä ja valunnan pääuomat ovat kuitenkin samansuuntaisia DINF algoritmin kanssa.

Esimerkkikuvan (kuva 19) alin rakennus osoittaa, että virtaus voi suuntautua yhteen samaan suuntaan myös algoritmista riippumatta. Virtausuoman ollessa selkeä, kaikki algoritmit päätyvät samaan tulokseen. Tämä on havaittavissa myös siitä, että D8-algoritmin käyttämät jyrkimmät uomat ovat vahvimpia virtausuomia myös DINF- ja MFD-algoritmeilla ja lähes kaikki algoritmien virtausreitit päätyvät esimerkissä lopulta samoihin isompiin vesiuomiin.

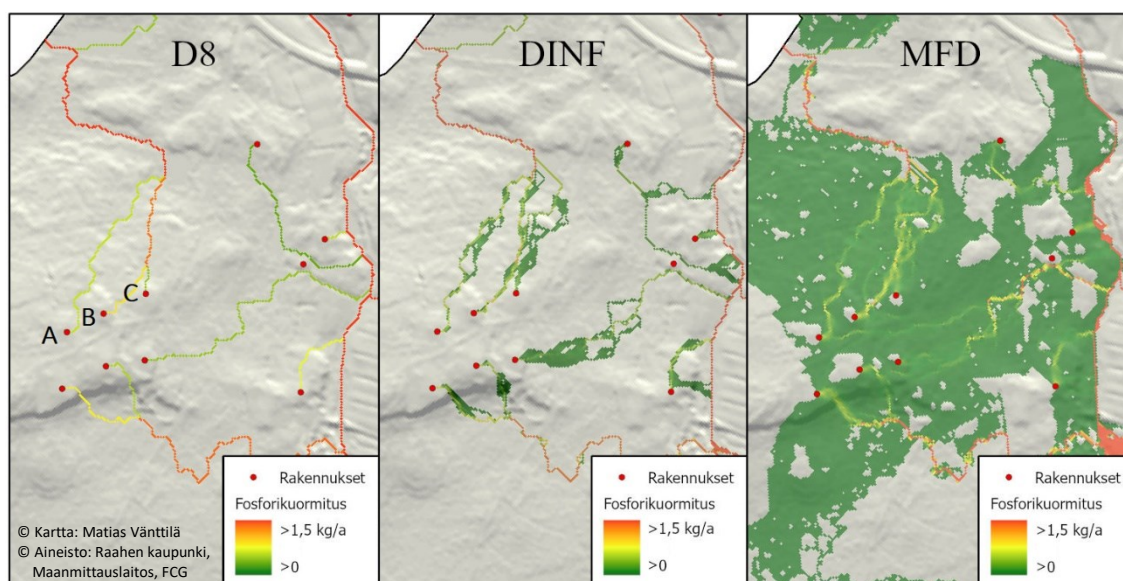
5.2 Algoritmien vaikutus kuormituksen kertymään

Seuraavaksi tarkastellaan osavaluma-alueiden ja koko Pattijoen valuma-alueen avulla algoritmien käyttäytymiserojen vaikutusta kuormituksen kertymään. Koko valuma-alueella kuvaavassa Pattijoen purkupisteessä MDF-algoritmi erottui kahdesta muusta kuormituskertymän määrässä (taulukko 2).

Taulukko 2. Kokonaiskuormituksen kertyminen Pattijoen päätepisteeseen eri algoritmeilla.

Algoritmi	Kokonaiskuormitus päätepisteessä
MFD	98,3 %
DINF	96,0 %
D8	96,0 %

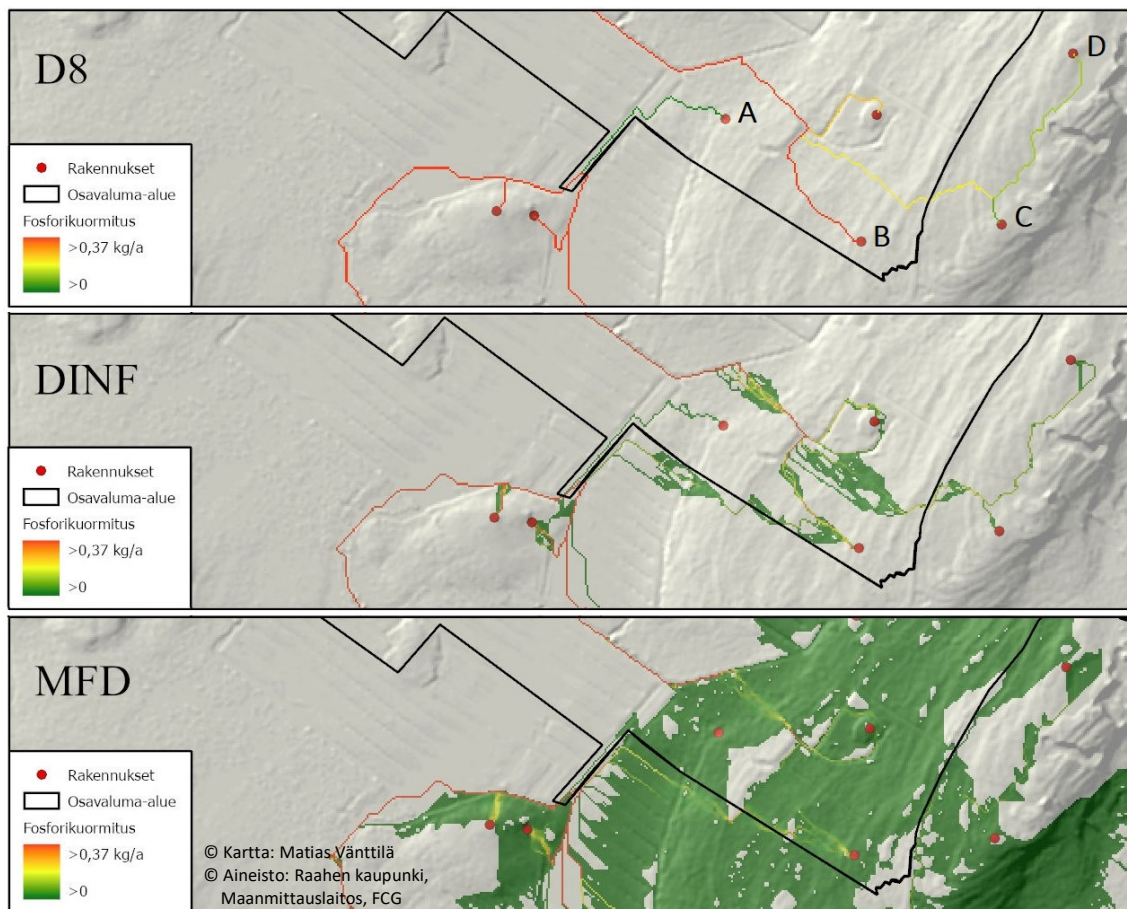
MFD-algoritmi kerrytti käytetyn kuormitusaineiston ravinteista 98,3 % Pattijoen päätepisteeseen, kun DINF ja D8 ylsivät 96 %. Erot sekä hävikki kokonaiskuormituksen kerryttämisessä selittyvät osittain kuvassa 20 esitetyn esimerkkikohteen avulla.



Kuva 20. Eri algoritmien käyttäytymistä valunnamallinnuksessa valuma-alueen rajan läheisyydessä.

Kuvassa 20 D8-algoritmi kuljettaa rakennusten A, B ja C virtauksen suoraan valuma-alueerajauksen ulkopuolelle kuvan vasempaan ylänurkkaan. Kyseisten rakennusten kuormitus ei siis kulkeudu Pattijoen purkupisteeseen. DINF-algoritmi mallintaa kyseisten rakennusten valunnan samalla tavalla, vaikkakin sen valunta jakautuu alussa jonkin verran. Sen sijaan MFD-algoritmin mallintaman valunnan jakautuminen on tasaisella alueella hyvin aggressiivista ja osittaiskuormitus jakautuu myös A, B ja C talojen osalta hyvin laajalle alueelle. Osa tästä jakautuneesta kuormituksesta päättyy isompiin uomiin, jotka johtavat lopulta Pattijoen päätepisteeseen. A ja B talosta on myös havaittavissa hieman vahvempi kuormitusvalunnan uoma, joka virtaa rakennuksista kohti valuma-alueen keskustaa. Toisaalta MFD-algoritmi kuljettaa myös pieniä määriä muiden kuin A, B ja C talojen kuormitusta valuma-alueen rajojen ulkopuolelle, mikä tasoittaa eroa.

Osavaluma-alueiden purkupisteisissä algoritmit kerryttivät 95–100 % osavaluma-alueiden kokonaiskuormituksesta. Päävaluma-alueen mukaisesti erot D8 ja DINF välillä olivat hyvin pieniä. Kyseisten algoritmien välillä suurin ero oli 0,5 % Huopakinojan valuma-alueella. MDF ero muihin algoritmeihin kasvoi osavaluma-alueilla 0,1–5,2 % suuruiseksi. Seuraavan esimerkkikuvan (kuva 21) avulla tarkastellaan DINF- ja D8-algoritmien välisen eron syytä, sekä myös MFD-algoritmin eroavaisuuden mahdollisia syitä.

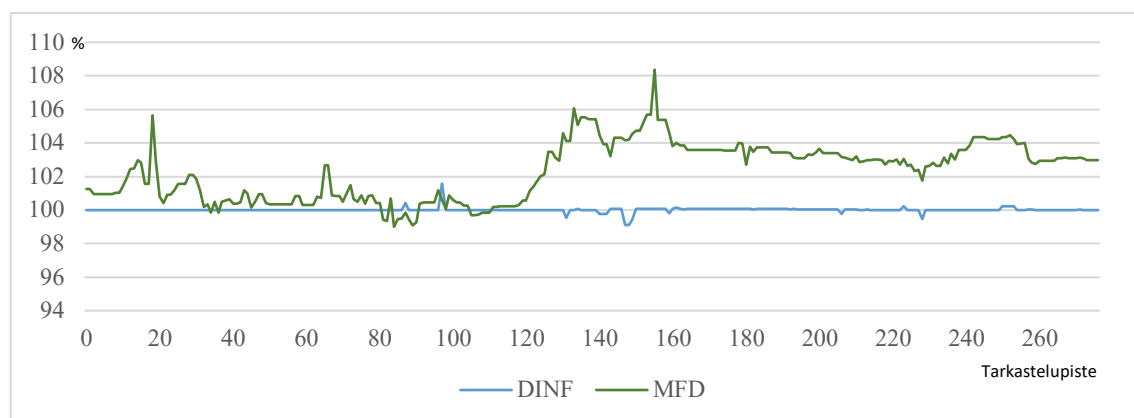


Kuva 21. Virtaussuunta-algoritmien käyttäytymistä osavaluma-alueen rajan läheisyydessä.

Kuvassa 21 osavaluma-alueen rajan läheisyydessä olevien rakennusten kuormitukset jakautuvat algoritmien välillä hieman eri tavalla. D8-algoritmi kuljettaa B, C ja D rakennusten kuormituksen yläpuolella olevaan osa-valuma-alueeseen ja A rakennuksen kuormituksen alapuoliseen osavaluma-alueeseen. Esimerkkikuvassa ero DINF- ja D8-algoritmin välillä syntyy B rakennuksen kohdalla, koska DINF kuljettaa osan B rakennuksen kuormituksesta alapuoliseen valuma-alueeseen. Esimerkissä MFD-algoritmi jakaa jälleen kuormitusta muita algoritmeja aggressiivisemmin, mutta mukailee päävirtausuomissa erityisesti DINF-algoritmia. Sen jakautunut kuormitus on niin pientä, ettei kuvasta voida täsmällisesti sanoa mihin kaikkialle rakennusten kuormitus päätyy.

Esimerkkikuvien kaltaisten tilanteiden laajempi tarkastelu ei kuitenkaan selittänyt kokonaan MFD-algoritmin poikkeavuutta. Asiaa yritettiin hakea ratkaisua tarkastelemalla algoritmien suhteellista fosforikertymää Pattijoen pääuomassa noin 100 metrin välein asetettujen tarkastelupisteiden avulla. Tarkastelupisteet ovat asetettu

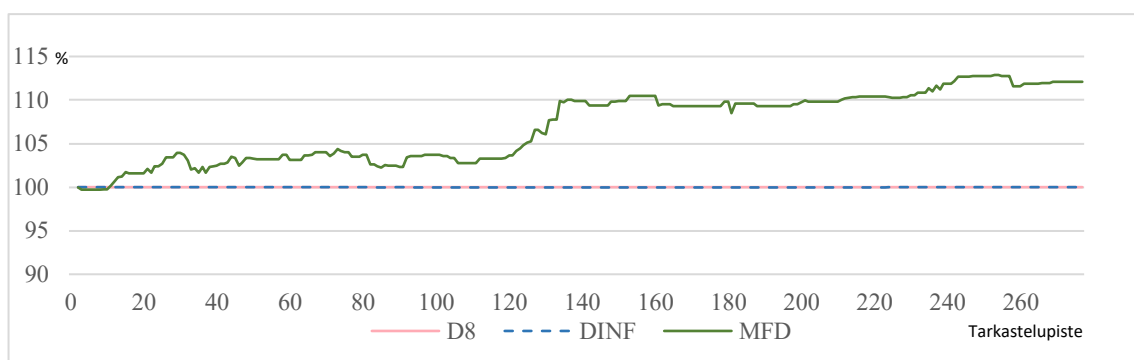
sellaisiin soluihin, joissa koko yläpuolisen alueen kuormitus kohdistuu jokaisella algoritmilla yhteen soluun. Tällöin algoritmien kertymä on vertailukelpoista (kuva 22).



Kuva 22. Monivirtaussuunta-algoritmien kertymän suhteellinen ero D8-algoritmiin verrattuna.

Kuvasta nähdään kuinka DINF-algoritmi mukailee D8-algoritmin arvoja Pattijoen pääuomassa. DINF-algoritmin pienet paikalliset poikkeamat ovat havaittavissa myös MDF-algoritmin kertymässä ja ne selittyvät monivirtaussuunta-algoritmien kyvyllä jakaa virtausta. Kyseisissä kohdissa yksittäisten rakennusten kuormitus jakaantuu DINF- ja MDF-algoritmeilla ja kuormitus kohdistuu pääuomaan hiukan eri kohdassa kuin D8-algoritmillä. Sen sijaan MDF-algoritmin suurin poikkeavuus syntyy pisteiden 120–140 välillä. Pisteiden 120–130 välillä ei ole kuitenkaan yhtään rakennusta tai sivu-uomaa, joka muuttaisi pääuomaan kohdistuvaa kuormitusta. Näin ollen syy ei ole aineiston tai kuormituksen ominaisuuksissa.

Seuraava kuvaaja (kuva 23) esittää samoilla tutkimuspisteillä toteutetun testin, jossa Pattijoen yläjuoksun päähän asetettiin yksi rakennus kuormitusarvolta 100.



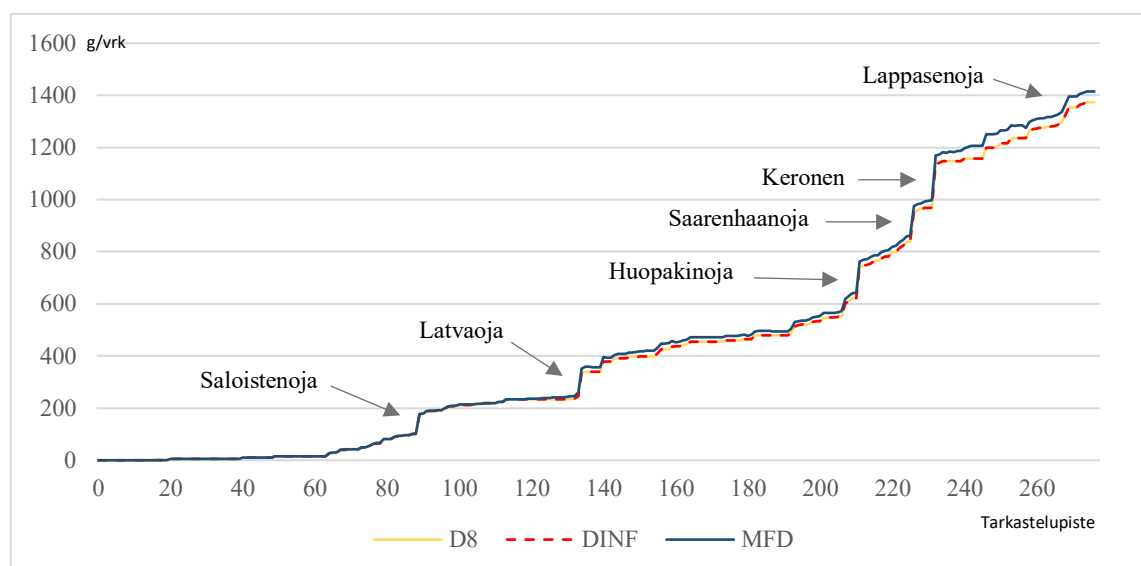
Kuva 23. Testiarvon kertymä Pattijoessa käytetyillä virtaussuunta-algoritmeilla.

Kuvaajasta (kuva 23) havaitaan, että yläjuoksulle asetettu kokonaiskuormitusarvo pysyy vakiona DINF- ja D8-algoritmeilla, mutta MDF-algoritmi muuttaa kokonaiskertymää vaihtelevasti koko pääuoman ajan. Kuvaajia (kuva 22 ja 23) vertailemalla havaitaan, että MFD-algoritmin fosforikertymän suhteellinen ero kasvaa suhteessa D8- ja DINF-algoritmeihin selkeästi testi-arvon 100 kasvua mukaillen. Tällöin MFD-algoritmin kuormitusmallinnuksen tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia D8- ja DINF-algoritmien kanssa, koska osa MFD-arvojen kasvusta johtuu algoritmin laskennallisista ominaisuuksista.

Kuormituksen prosentuaalinen muutos jätevesiasetuksen eri vaiheissa oli kuitenkin kaikilla algoritmeilla hyvin samankaltainen.

5.3 Jätevesiasetuksen kuormitusvaikutukset Pattijoessa

Kuormitusmallinnus sisälsi mallinnustuloksia myös jätevesiasetuksen konkreettisista vaikutuksista ravinteiden määrään. Mallinnuksen alueellisen ulottuvuuden vuoksi tuloksia pystyttiin soveltamaan yksittäisissä tarkastelupisteisissä sekä koko valuma-alueen tasolla. Pattijoen pääuomassa haja-asutuksen tuottaman fosforikuormituksen nykytilanne oli mallinnuksen mukaan alla olevassa kuvassa 24 esitetyn kaltainen.



Kuva 24. Haja-asutuksen fosforikertymä Pattijoessa eri virtaussuunta-algoritmeilla mallinnettuna.

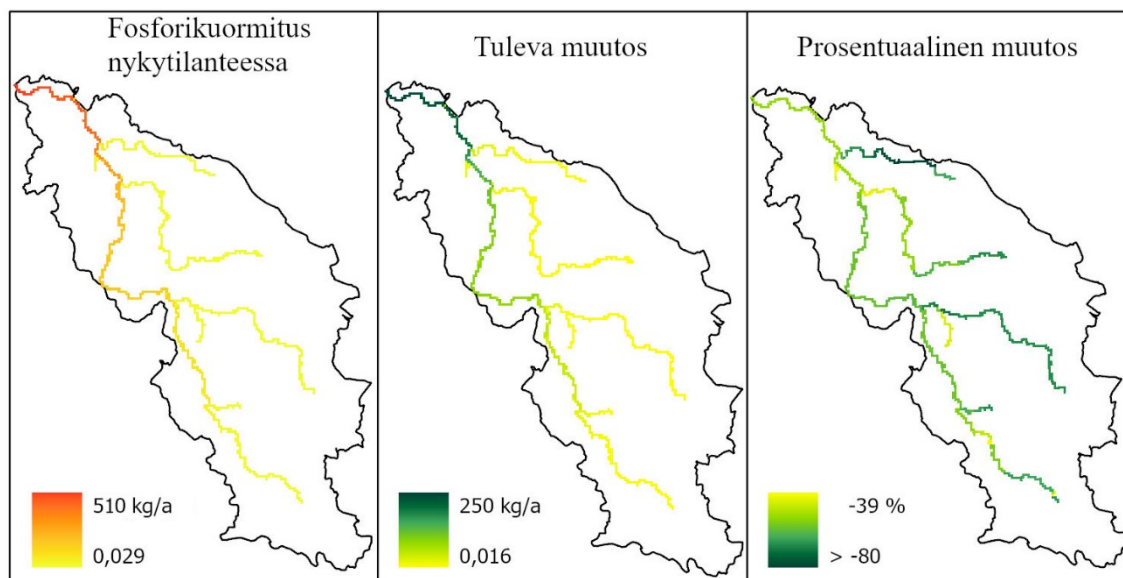
Kuvaajasta (kuva 24) nähdään kuinka kuormitus pääuomassa kasvaa aina suurimpien sivu-uomien liittyessä pääuomaan. Voimakkain fosforikuormituksen kasvu painottuu Pattijoen loppupuoolelle, mihin sijoittuvat myös suurimmat asutuskeskittymät. Kuormitusmallinnuksen mukaan Pattijoen fosforikuormitusmäärä oli syksyllä 2019 DINF-algoritmillä ja kuormitusaineistolla määritettynä noin 510 kg/a haja-asutuksen osalta. Typpikuormituksen määräksi mallinnus antoi 5336 kg/a. Suomen ympäristökeskuksen VEMALA-kuormituslaskentamallin mukaan vuosien 2012–2019 keskimääräinen fosforikuormitus Pattijoen valuma-alueella on ollut haja-asutuksen osalta 493,32 kg/a (Huttunen 2020). Pattijoen yleissuunnitelman mukaan haja-asutuksen fosforikuormitus oli vuonna 2019 noin 527 kg/a ja typpikuormitus noin 4380 kg/a (FCG 2019). Mallinnetut jätevesiasetuksen vaikutukset koko valuma-alueen ravinnekuormitusmääriin on esitetty alla olevassa taulukossa 3.

Taulukko 3. Jätevesiasetuksen mallinnetut kuormitusvaikutukset Pattijoen valuma-alueella DINF-algoritmillä.

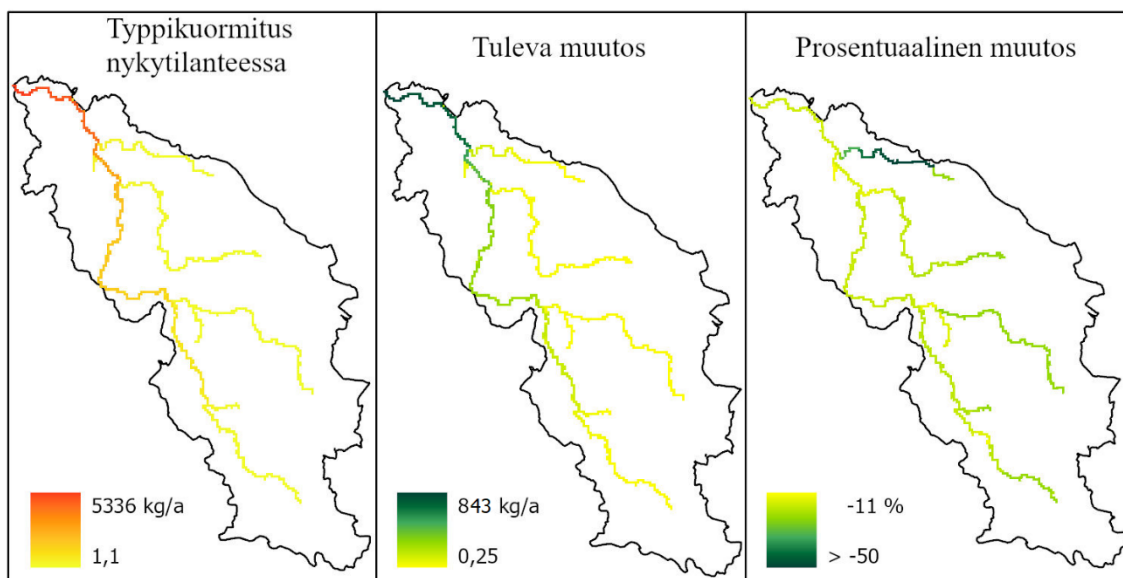
	Ei asetusta	Muutos	Nykytilanne	Muutos	Asetuksen jälkeen	Kokonaismuutos
	<i>kg/a</i>	%	<i>kg/a</i>	%	<i>kg/a</i>	%
Typpi	5822	- 8	5336	- 16	4493	- 23
Fosfori	652	- 22	510	- 49	260	- 60

Jätevesiasetus on parantanut mallinnuksen mukaan Pattijoen haja-asutuksen ravinnekuormitusmäärää aineistonkeruutilanteeseen (syksy 2019) mennessä typen osalta noin 8 % ja fosforin osalta noin 22 %. Haja-asutuksen tuottama kokonaisravinnemäärä Pattijoessa tulee parantumaan mallinnuksen mukaan vielä noin kaksi kertaa enemmän kuin aineistonkeruu tilanteeseen mennessä. Typpikuormituksessa parannusta tapahtuu vielä 16 % ja vastaavasti fosforikuormituksessa 49 %. Jätevesiasetuksen kokonaisvaikutukset haja-asutuksen ravinnekuormitukseen ovat asetuksen täysmääräisen toteutumisen jälkeen typelle -23 % ja fosforille -60 %.

Nykyinen haja-asutuksen ravinnekuormitus, niin fosforin kuin typen osalta, painottuu jo aikaisemmin todetusti Pattijoen alajuoksulle ja purkupisteen läheisyyteen (kuvat 25 ja 26). Myös suurin kuormitusmuutos tapahtuu luonnollisesti samalla alueella.



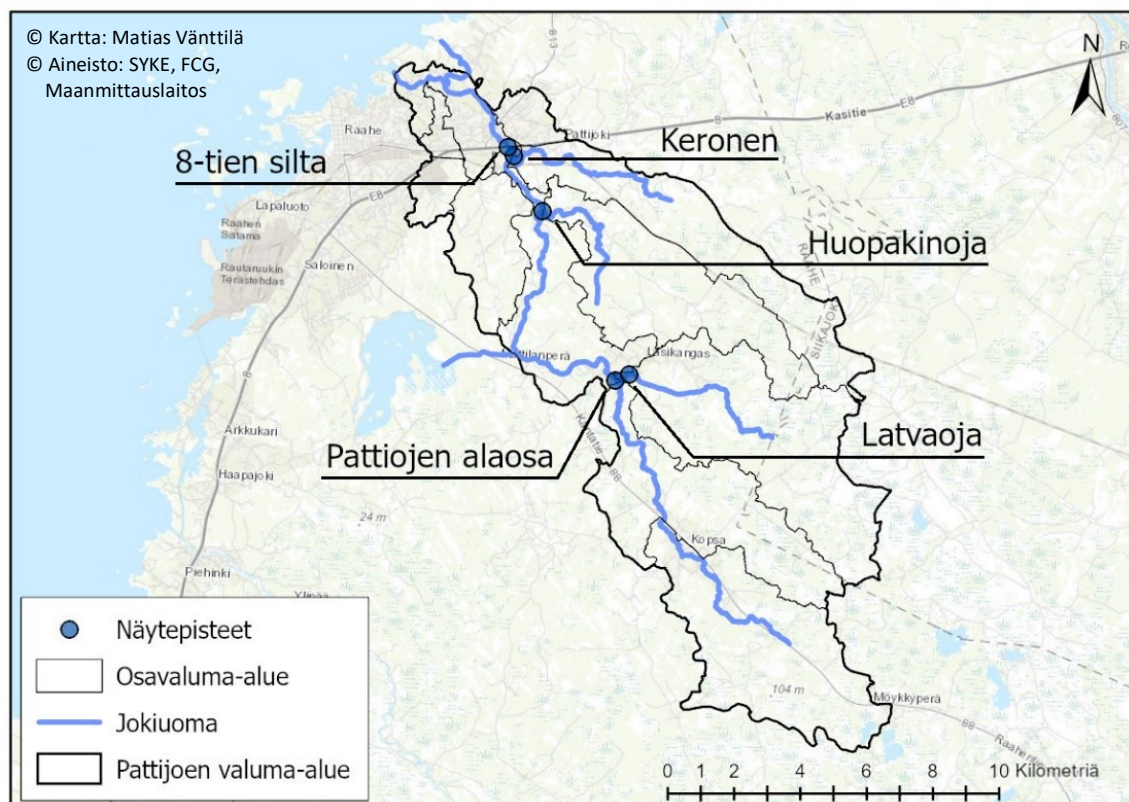
Kuva 25. DINF-algoritmillä mallinnettu jätevesiasetuksen alueellinen vaikutus haja-asutuksen tuottamaan fosforikuormitukseen.



Kuva 26. DINF-algoritmillä mallinnettu jätevesiasetuksen alueellinen vaikutus haja-asutuksen tuottamaan typpikuormitukseen

Prosentuaalisesti voimakkain kuormituksen väheneminen sen sijaan painottuu uomien latvaosiin. Usean sivu-uoman latvaosa muuttuu yläjuoksua kohti niin pieneksi, ettei sitä luokitella SYKE:n aineistossa vesistöksi. Tällöin rakennukset ovat 100 metrin määrittävyöhykkeen ulkopuolella ja niiden ei ole tarvinnut päivittää vielä jätevesijärjestelmää. Kerosenjan latvaosassa tuleva kuormitusmuutos on fosforin osalta jopa yli -80 % ja typen osalta jopa yli -50 % nykytilanteesta. Alue sijoittuu pohjavesialueelle (kuva 1), jossa lain mukaisten toimenpiteiden tavoitteena on poistaa haja-asutuksen ravinnekuormituksen lähes kokonaan.

Haja-asutuksen kuormitus on kuitenkin vain osa koko valuma-alueen kuormituksesta. Tarkastelen seuraavaksi mallinnettujen kuormitusmuutosten vaikutuksia Pattiojen vedenlaatuun sekä alueen kokonaisravinnemääriin. Yhdistän mallinnuksen tulokset Pattiojen yleissuunnitelmassa otettujen vesinäytteiden kanssa, joiden avulla tarkastelen vedenlaadun muutoksia viidessä eri tarkastelupisteessä. Näytepisteet sijaitsevat sivu-uomien osavaluma-alueiden purkupisteissä sekä 8-tien sillan alla. Pisteet on esitetty kuvan 27 kartassa.



Kuva 27. Kuormitustarkastelussa käytettyjen näytepisteiden sijainnit tutkimusalueella

8-tien näytepiste heijastaa kokovaluma-alueen tilaa, vaikka näytepisteen alapuolella sijaitsee vielä viemäriverkon ulottumattomissa olevia rakennuksia. Valtaosa pisteen alapuolisesta alueesta on kuitenkin viemäriverkoston piirissä, eikä näin tuota haja-asutuksen kuormitusta. Näytteet on otettu 20.3.2019 – 30.7.2019 välisenä aikana. Lisäksi 8-tien sillan alla on jatkuvan seurannan piste, joten tuloksissa on lisäksi käytetty vuosien 2012–2019 keskiarvoa kuvaamaan vedenlaadun kokonaistilannetta. Koko valuma-alueen sekä osavaluma-alueiden kokonaiskuormituksena on käytetty Pattijoen yleissuunnitelmassa määritettyjä kuormitusarvioita.

Jätevesiasetuksen vaikutusta tarkastelupisteissä on arvioitu taulukossa 4. Taulukossa esitetään pisteen vesinäytteiden mittaustulokset eri ajankohdilta sekä mallinnuksen vaikutus näihin ennen ja jälkeen jätevesiasetuksen. Taulukossa on lisäksi väreillä pintavesien tilaluokittelun mukaiset ekologiset tilat (Aroviita ym. 2019). Pattijoki luokitellaan keskisuurten turvemaiden joeksi ja luokkarajat ovat asetettu sen mukaisesti.

Taulukko 4. Pattijoen tarkastelupisteiden näyte- ja mallinnustulokset, jätevesiasetuksen aiheuttama kokonaiskuormituksen prosentuaalinen muutos sekä kuormitusarvojen tilaluokittelu.

Näytepiste	Näytteenotto pvm	Fosfori näyte (mitattu) µg/l	Ilman asetusta (mallinnus) µg/l	Asetuksen jälkeen (mallinnus) µg/l	Kokonais- muutos (mallinnus) %	Typpi näyte (mitattu) µg/l	Ilman asetusta (mallinnus) µg/l	Asetuksen jälkeen (mallinnus) µg/l	Kokonais- muutos (mallinnus) %
Pattijoen alaosa	20.3.2019	42	43	40	-7	610	613	602	-2
	17.4.2019	77	78	73	-7	1400	1408	1382	-2
	30.7.2019	51	52	48	-7	410	412	405	-2
Latvaaja	20.3.2019	54	54	53	-3	700	701	695	-1
	17.4.2019	90	90	88	-3	1800	1804	1784	-1
	30.7.2019	67	67	65	-3	490	491	486	-1
Huopakinoja	17.4.2019	220	227	215	-5	2500	2528	2478	-2
	30.7.2019	160	165	156	-5	1200	1213	1189	-2
Keronen	17.4.2019	160	163	152	-7	3100	3147	3066	-3
	30.7.2019	42	43	40	-7	880	893	870	-3
Valuma-alue (8-tien silta)	20.3.2019	68	71	65	-8	930	936	920	-2
	17.4.2019	140	146	134	-8	2100	2113	2076	-2
	30.7.2019	81	85	78	-8	700	704	692	-2
	Keskiarvo 2012-2019	64	67	61	-8	996	1002	985	-2

erinomainen	hyvä	tyytyttävä	välttävä	huono
-------------	------	------------	----------	-------

Taulukon 4 vesinäytteiden kuormitusarvot vaihtelevat mittausajankohdan mukaisesti. Näytteenotot ajoittuvat ennen kevään virtaamahuippua maaliskuuhun, huhtikuun ylivirtaaman aikaan ja heinäkuuhun alivirtaaman aikaan. Pattijoen alaosan ja Latvaajan vesinäytteiden typpi- ja fosforiarvot ovat maltillisimpia. Huopakinojan ja Kerosen arvoissa on voimakasta vaihtelua, mikä saattaa johtua myös mittauspisteen sijainnista tai mittausajankohdan hetkellisistä olosuhteista.

Jätevesiasetuksen seurauksena tapahtuva kokonaismuutos Pattijoen ravinnetilanteessa vaihtelee eri osavaluma-alueilla. Fosforikuormituksen muutos jää useimmilla osavaluma-alueilla alle 8-tien mittauspisteen keskiarvon. Typpikuormituksen kokonaismuutos on pienempää, mutta jakautuu tasaisemmin koko valuma-alueelle. Kokonaismuutoksen suuruuteen vaikuttavat osavaluma-alueiden kokonaisravinnekertymän rakenteet. Muutos mallinnetussa fosforikuormituksessa on pienempää osavaluma-alueilla, koska haja-asutuksen osuus osavaluma-alueiden kokonaisfosforikuormituksesta on koko valuma-aluetta pienempi. Pääosa haja-asutuksen kuormituksesta kohdistuu Pattijoen pääuoman loppuosaan ja näkyy vain 8-tien mittauspisteen tuloksissa. Typpikuormituksen muutos jää fosforikuormitusta maltillisemmaksi jätevesiasetuksen puhdistusvaatimuksista johtuen. Kerosen osavaluma-alueella mallinnettu typpikuormituksen muutos on muita näytepisteitä suurempi, koska haja-asutuksen osuus osavaluma-alueen kokonaistyppikuormituksesta on siellä muita näytepisteitä suurempi.

Mallinnuksen mukaan kokonaisravinnemäärä tulee parantumaan jätevesilainsäädännön seurauksena 8-tien sillan pisteessä fosforin osalta noin 8 % ja typen osalta noin 2 %. Tämä edellyttää, että jätevesiasetus saadaan kokonaisuudessa käytäntöön. Pattijoen vedenlaadun ekologinen tila ei luokittelun perusteella muutu merkittävästi. Luokkarajojen lähellä olevat arvot voivat mallinnuksen mukaan muuttua joidenkin näytepisteiden kohdalla nykytilanteesta parempaan luokkaan.

6. POHDINTA

Paikkatietopohjaisen vesistönmallinnuksen sekä kuormitusmallintamisen yhdistäminen ovat toimineet tätä työtä kantavana teemana. Nykyiset vesistöjen ravinnekuormitusta simuloivat mallit ovat todella moniulotteisia ja tämä työ on yksinkertaisuudessaan raakile niiden joukossa. Kuitenkin työn keskeinen teoria ja tulokset tarjoavat aiheesta kiinnostuneille kosketuspintaa paljon kiinnostusta herättäneeseen jätevesikeskusteluun sekä sen vaikutusten paikkatietopohjaiseen mallintamiseen. Lisäksi painotusrasterin laajemmat sovellusmahdollisuudet ja kehitystarpeet nousivat tutkimusprosessissa esille, mikä on valunnamallinnuksen algoritmien tarkastelun ohella tämän tutkimuksen oleellista antia geoinformatiikan tieteenalaa ajatellen.

Tässä tutkimuksessa hyödynnetty aineistokokonaisuus loi mallinnuksen toteuttamiselle uskottavan pohjan. Valmiit työssä hyödynnetyt aineistot ovat valtakunnallisten toimijoiden tai Raahen kaupungin tuottamia ja niitä voidaan pitää laadukkaina. Poikkeuksena oli Raahen kaupungin itse ylläpitämä rakennus- ja huoneistorekisteri, joka sisälsi myös päivittämätöntä ja päällekkäistä tietoa. Päivittämätön ja päällekkäinen tieto oli kuitenkin helposti havaittavissa ja korjattavissa, eikä se heikentänyt aineiston luotettavuutta. Jätevesikyselyn 1450 vastusta loivat vahvan pohjan kuormitusaineiston muodostamiselle. Jätevesikyselyn eksakti hyödyntäminen jäi tutkimusaluearajauksen vuoksi alkuperäistä suunnitelmaa vähäisemmäksi. Tutkimusalueen ulkopuolisten vastausten informaatio osoittautui kuitenkin myös erittäin hyödylliseksi. Tutkimusaluetta laajemman koko vastausaineiston perusteella pystyttiin muodostamaan kokonaistilannekuva alueen jätevesijärjestelmistä sekä niihin vaikuttavista muuttujista. Kokonaiskuvan hahmottaminen helpotti jätevesikyselyn ulkopuolisen oheisaineiston tulkitsemista, jolloin koko tutkimusalueesta saatiin yhtenäinen kattava kuormitusaineisto.

Kuormitusaineiston hyödyntäminen mallinnuksessa sisällytti työhön myös ravinteiden muodostumiseen, kulkeutumiseen ja jätevesijärjestelmiin liittyvää itsenäistä teoriaa. Työn tarkoitus ei ollut keskittyä ravinnekertymään substanssina kysymyksenä, joten siihen kuuluvaa teoriaa on käsitelty vain pintapuolisesti. Tämä on hyvä ottaa huomioon mallinnuksen kuormitustuloksia tarkastellessa. Haja-asutuksen kuormitusmäärän muodostamisessa sekä ravinteiden kulkeutumisen huomioimisessa

käytetyt menetelmät kytkeytyvät kuitenkin tutkimuksiin ja ovat samankaltaisia Suomen ympäristökeskuksen ravinnekuormitusmalli VEMALA:n kanssa. Itse jätevesijärjestelmiin liittyvä teoria tuli päivätyöni kautta erittäin tutuksi ja sen soveltaminen työssä tuntui luontevalta.

Ravinnekuormituksen määrän laskeminen sisälsi omat haasteensa. Esimerkiksi vanhojen jätevesien käsittelyjärjestelmien puhdistustehoa on lähes mahdotonta määrittää täsmällisesti, sillä järjestelmien sääntely on ollut vuosikymmenten kuluessa väljempää ja käytännön toteutukset ovat monenkirjavia. Vanhojen järjestelmien puhdistustehoa ei voi olettaa nykyjärjestelmien mukaisiksi käytetyn tekniikan ja iän tuoman tehon heikkenemisen (esim. Vuorela 2001) takia. Tästä syystä vanhojen jätevesijärjestelmien puhdistustehosta muodostettiin tutkimuksiin ja kyselyvastauksiin pohjautuva arvio, joka on esitelty kappaleessa 4.1.2.

Edellä mainitussa kappaleessa esitetyistä kertoimista lisäksi vapaa-ajan asuntojen varustelutason vaikutus ravinnekuormitukseen on tutkimuksiin pohjautuva oma arvio. Laissa määritelty ominaiskuormituskerroin olettaa rakennusten varustelutason normaaliksi, joten kantovedenvaraisten rakennusten kuormitus on puolitettu varustelutason niukkuuden perusteella. Tutkimuksiin ja kyselyvastauksiin pohjautuvat arviot ovat tässä tapauksessa mielekkäämpiä, kuin muuttujien huomioimatta jättäminen. Arvioiden aiheuttama epävarmuus tulee kuitenkin huomioida tulosten tarkastelussa. Vanhojen jätevesijärjestelmien puhdistustehoarvion vaikutus on merkittävä, etenkin jätevesiasetusta edeltävää tilannetta mallintavissa tuloksissa. Vapaa-ajan asuntojen varustelutason huomioiminen ei sen sijaan vaikuta juurikaan kokonaistuloksiin, sillä harmaiden vesien kuormitus on luonnostaan pientä ja vapaa-ajan asuntojen määrä aineistossa oli vähäinen.

Kyselystä johdetun kuormitusaineiston luotettavuuteen ovat saattaneet vaikuttaa myös ihmisten pyrkimys kaunistella oman kiinteistön asioita, sekä inhimillinen tietämättömyys asioista. Kohtasin työssäni aika ajoin jätevesijärjestelmiin liittyviä virheellisiä käsityksiä sekä suurpiirteisiä vastauksia, joita esiintyi myös kyselyvastauksissa. Näiden tekijöiden vaikutus jää kuitenkin marginaaliseksi, sillä yksityiskohtien väärinymmärtäminen ei vaikuta merkittävästi kyselyvastauksien kokonaiskuvaan ja suurpiirteisiin vastauksiin oli saatavilla tukea oheisaineistoista. Epäily suoranaisestä valehtelusta jäi yksittäistapauksiin. Kyselyaineisto tuli

kokonaisuudessaan päivätyöni sekä tutkimuksen myötä niin tutuksi, että virheelliset yksityiskohdat tulivat suurelta osin esille ja korjatuksi.

Korkeusmallin käyttö mallintamisessa osoittautui yllättäen haasteelliseksi ja aikaa vieväksi. Kappaleessa 4.3.1 ”Korkeusmallin esikäsittely” esitelty korkeusmallin auki polttaminen vaati tarkempaa perehtymistä aiheeseen, koska korkeusmallin polttamisella tai polttamatta jättämisellä on merkittävät vaikutukset valunnan käyttäytymiseen pienemmissä uomissa. Nykyään pienetkin vesistönuomat sisältävät huomattavia määriä ojarumpuja ja siltoja, jotka aiheuttavat sellaisenaan vääristymiä valunnan mallintamiseen.

Työn aikana pohdin ja kehitin eriasteisia korkeusmallin polttamisvaihtoehtoja, joilla saavutettaisiin mahdollisimman luotettava ja kattavasti korjaava lopputulos mallinnusta varten. Haastetta aineiston esikäsittelyyn lisäsi se, että Pattijoen pääuoma on jo itsessään kohtalaisen pieni. Sen merkittävimmät sivu-uomat ovat kooltaan vielä pääuomaa pienempiä, vain muutaman metrin leveitä. Sivuuomia pienemmät uomat ovat kokonsa vuoksi jo melko epätarkkoja pohja-aineistossa. Tällöin uomien yhtenäisyyttä ja rumpujen olemassaoloa on hankalampi varmistaa suoraan pohja-aineistosta. Tällaisten ojien kattava auki polttaminen olisi ollut epäluotettavaa alkuperäisen aineiston yksinkertaistamista. Tutkimuksessa päädyttiin lopulta aukaisemaan Suomen ympäristökeskuksen vesistöiksi luokittelemat uomat auki, sillä niiden yhtenäisyys ja rumpujen olemassaolo voidaan olettaa luotettavaksi. Aineisto sisälsi Pattijoen pää- ja sivu-uomat. Uomia läpäisevät esteet käytiin läpi käsityönä manuaalisesti, jolloin polttamisen tekninen toteutus oli helpompaa. Paikallisen rummun polttaminen nollassoon korjautuu kohtalaisen hyvin korkeusmallin eheyttämisessä, sillä uoman pohja palautuu lähimmän purkupisteen korkeuteen. Koko valitun uomaverkoston auki polttamisessa tekninen toteutus olisi pitänyt toteuttaa portaittain, jotta uoman pohjan korkeus ei olisi vääristynyt liikaa. Epäonnistunut toteutus olisi vaikuttanut haitallisesti etenkin monivirtaussuunta-algoritmien jakautumiseen vesistöuomissa.

Suomen ympäristökeskuksen kehittämän VALUE-työkalun pohja-aineisto on tuotettu poltattamalla auki portaittain eri syvyyksille Ranta10-aineiston mukaiset uomat sekä muut yli 2 m leveät jokiviivat ja vesistöalueet (VALUE-virtaussuuntamalli 2020). Haittavaikutus jää tässä tapauksessa pienemmäksi, koska VALUE-työkalu käyttää pelkästään D8-algoritmia. D8 yksivirtaussuunta-algoritmina etsii vain yhden jyrkimmän

vesistöreitit eikä jakautumisongelmaa synny, vaikka uoma olisi poltettu paikoittain todellisuutta alemmas. Toisaalta esimerkiksi maastotietokannan sisältämien uomavektoreiden laajempi hyödyntäminen tutkimusalueen korkeusmallin aukaisemisessa olisi voinut johtaa kattavampaan ja todellisempaan korkeusmalliin. Tämä olisi edellyttänyt pidemmälle jalostettua teknistä menetelmää rasterin käsittelyssä, eikä tämän työn resurssit riittäneet siihen.

Virtaussuunta-algoritmien tarkastelu tässä tutkimuksessa osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi. Selainpohjaiset paikkatietopalvelut ovat kehittyneet viime aikoina vauhdikkaasti, jonka myötä myös virtaussuunta-algoritmeihin pohjautuvia palveluita on tullut yleisesti saataville. Palvelut ovat lähinnä D8-algoritmiin pohjautuvia valuma-alueen rajaustyökaluja, joita käytettiin myös päivätyössäni Raahen kaupungilla. Algoritmien käytännön ulottuvuus, hyödynnettävyys ja ajankohtaisuus luovat mielenkiintoisen kontekstin niiden tulevaisuudelle. D8-algoritmin suosio perustuu todennäköisesti sen yksinkertaisuuteen ja ymmärrettävyyteen. Tämä tuli ilmi myös tässä tutkimuksessa. Erityisesti MFD-algoritmin hyödynnettävyydessä oli haasteita, sillä sen tulokset eivät olleet vertailukelpoisia D8- ja DINF-algoritmien kanssa.

MFD-algoritmin toimintaidea voidaan pitää edistyksellisenä, sillä se kokoaa aikaisemmin kehitettyjen algoritmien vahvuuksia yhteen. Algoritmi kykenee muuttamaan jakautumisvoimakkuutta maaston muotojen mukaan ja on askel kohti edistyksellisempiä algoritmeja. Vastaavasti sen ongelmat ilmenevät algoritmin ominaisuuksissa valunta-arvojen kerryttämisessä. Ongelmat johtuvat arviolta algoritmin matemaattisista ominaisuuksista, sillä algoritmin muuttuva potenssi liukulukuna aiheuttaa pyöristysongelmia kertymän jakautumisessa. Pyöristysongelmien kertyessä kumuloituva arvo ei pysy täsmällisenä vaan muuttuu aina jakautumista sisältävien solujen jälkeen. Tämän arvion antoi myös Esrin tuki, jolta tiedusteltiin asiaa. Tulostallinnukset päädyttiinkin toteuttamaan pitkälti DINF-algoritmin avulla. DINF-algoritmi mallintaa monivirtaussuunta ominaisuuksiensa vuoksi D8-algoritmia todenmukaisemmin, mutta sen jakautuminen ei aiheuta alkuperäisen kokonaisarvon muuttumista.

Kuormitusaineiston ja vesistönmallinnuksen yhdistäminen ratkesi lopulta painotusrasterin avulla. Painotusrasterin avulla onnistuttiin antamaan rakennuksille yksilölliset kuormitusarvot, jotka etenevät virtaussuunta-algoritmien mukaisesti kohti merta. ArcGIS-ohjelmassa pystyy käyttämään vain yhtä painotusrasteria osana

mallinnusta, jonka vuoksi kuormituslähteiden etäisyysvaikutus täytyi laskea mukaan jo alkuperäiseen kuormituslukuun. Painotusrasteri ominaisuutta kehittämällä pystyttäisiin luomaan uusia ulottuvuuksia esimerkiksi kuormitusmallintamisen suhteen. Toisen painotusrasterin lisääminen mallinnusmenetelmään mahdollistaisi vaikkapa etäisyysvaikutuksen alueellisen huomioimisen. Tällöin etäisyysvaikutus voitaisiin huomioida maaperän imeytymis- ja veden kulkeutumiskyvyn mukaan määriteltävällä valumiskerroin painotusrasterilla jokaisessa solussa erikseen. Valunnan ja kuormituksen määrän etenemisestä maaperässä tai sen pinnalla tulisi todenmukaisempaa. Tällöin tulosten tarkastelu myös vesistöalueiden ulkopuolella olisi mielekkäämpää.

Toiseksi, laajemmassa kuormitusmallinnuksessa painotusrastereilla voitaisiin huomioida kaikki alueen kuormitukseen vaikuttavat tekijät, kuten metsien ojitukset, hakkuut, eri maankäyttömuodot yms. Tällöin koko valuma-alueelta voitaisiin saada spatiaalisesti kattava alueellinen ravinnekuormitusmallinnus. Pohja-aineistot tähän olisivat pitkälti samat kuin perinteisissä kuormituselvityksissä. Myöskään teknisesti tämä ei olisi kovin monimutkaista; solun sisään tulevan virtauksen arvo käsiteltäisiin tarkasteltavan solun kertoimilla, minkä jälkeen arvoon lisättäisiin solun sisäinen mahdollisesti eri lähteistä muodostuva kokonaispainoarvo seuraavalla tavalla:

$$V_{ulos} = (V_{sisään} \times V_{sisäinen\ kokonaiskerroin}) + V_{sisäinen\ kokonaispainoarvo}$$

Mallinnuksen tuloksissa pohtimista aiheutti lisäksi kaikkien algoritmien kokonaiskertymän vajavaisuus Pattijoen purkupisteessä. Kuormitushäviön syy on valmiissa valuma-aluerajauksessa. Osa valuma-aluerajauksen mukaisesta aineistosta ei käytettyjen virtaussuunta-algoritmien mukaan kulkeudu Pattijoen purkupisteeseen. Tästä syystä valuma-alue rajausta olisi hyvä tehdä itse omaan aineistoon perustuen, jolloin se vastaisi paremmin tehtyä mallinnusta. Tosin yhtä jokaiselle algoritmille täydellistä valuma-alue rajausta ei ole edes mahdollista tehdä. Pattijoen kuormituselvityksessä oli käytetty pohja-aineistona Maamittauslaitoksen 10 m x 10 m korkeusmallia, mikä osaltaan selittää eroa valuma-aluerajauksissa. Valuma-aluerajauksissa käytetään lähes poikkeuksetta eksaktia rajausta, joka voidaan muodostaa yksisuuntaisen virtausmallin avulla. Täsmällistä valuma-aluerajausta on helppo hyödyntää valuma-alueen tilastollisten

muuttujien rajaamisessa. Toisaalta rajat todellisessa maailmassa ovat harvoin täsmällisiä, joten yksisuuntaisen D8-algoritmin käyttöön liittyy myös ongelmia. Tämä ilmenee usein siinä, että erilaisten tahojen tekemät valuma-alueajaukset ovat riippuvaisia siitä, kuka rajauksen on toteuttanut ja millä aineistolla. Saman vesistön valuma-alue voi näyttää hyvin erilaisilta eri tekijöillä. Monivirtaussuunta-algoritmeihin pohjautuvat valuma-alueajaukset voisivat vähentää tätä ongelmaa, sillä niiden tuottama raja ei olisi tiukasti rajattu, vaan siihen liittyisi eräänlainen rajan häivyttymisvyöhyke. Vyöhyke muodostuisi reuna-alueille kohdistuvasta jakautuneesta osittaisvirtauksesta.

Mallinnetut fosforikuormitukset asettuivat VEMALA-kuormituslaskentamallin keskiarvon ja FCG:n kuormituslaskennan kanssa hyvin samankaltaisiin lukemiin. Sen sijaan typpi-kuormituksen määrässä syntyi lähes 1000 kg/a eroavaisuus kuormituslaskennan lukemiin verrattuna. Eroavaisuuden täsmällistä syytä ei ollut mahdollista selvittää, sillä se olisi vaatinut vertailtavaksi VEMALA:ssa käytettävät pohja-aineistot joita ei ollut saatavilla. Jätevesikyselyn mukaan Pattijoen valuma-alueella päivitettyjen jätevesijärjestelmien määrä oli yllättävän vähäinen, joten esimerkiksi vanhojen jätevesijärjestelmien määrä- tai puhdistustehoarvio saattaa olla yksi syy typpi-mallinnuksen eroaviin tuloksiin. Typen ja fosforin puhdistusvaatimukset sekä puhdistuskyky nykyisissä järjestelmissä ovat toisiinsa verrattuna hyvin erisuuruisia, kun vanhassa toimimattomassa järjestelmässä molemmat ovat lähellä nollaa. Tämä voi aiheuttaa mallinnuksessa erisuuruisia vääristymiä typen ja fosforin välillä.

Ravinnekuormituksen määriä tarkasteltaessa on huomioitava myös Pattijoesta pumpattava vesi Haapajärven tekojärveen (kuva 1). Pumppaus vaikuttaa ajoittain merkittävästi Pattijoen veden määrään ja sitä kautta myös ravinnekertymään. Allasta ei kuitenkaan luokitella osaksi Pattijoen valuma-alueita, sillä pumppaus on keinotekoisia ja säädeltyä. Tästä syystä pumppausta ei huomioida kuormitusmallinnuksessa.

Tämän työn kuormitustulokset ovat lisäksi vain yhden valuma-alueen sisäisiä mallinnuksia. Tuloksia ei ole mielekästä yleistää laajemmalle. Jätevesiasetuksen todelliset vaikutukset vaihtelevat valuma-alueittain esimerkiksi asutuksen määrän ja maankäyttömuotojen mukaan.

Tämän tutkimuksen aihe syntyi arjen ihmettelyjen innoittamana, joten pidän maininnan arvoisena asiana myös toista jätevesikeskusteluissa syntynyttä aihetta.

Jätevesien pohjavesiin kohdistamaa hygieeninen vaikutus jää usein ravinnekuormituskeskustelun varjoon. Jätevedet vaikuttavat pohjavesialueilla erityisesti pohjaveden laatuun bakteerien ja muun epähygieenisyyden takia, eivät niinkään pohjaveden ravinnekuormitukseen. Pohjaveden pilaantumisriskin takia pohjavesialueilla tulkitaan jätevesille säädettyä lakia hyvin tiukasti. Tähän ratkaisuna ei kuitenkaan ole jätevesien kuormituksen vähentäminen, johon jätevesikeskustelu pitkälti keskittyy. Pohjavesialueilla oleellisinta olisi tarkastella jätevesien hygienisointia, josta on käyty liian vähän keskustelua. Voisikohan tätä ongelmaa lähestyä paikkatietoanalyysin avulla?

7. TUNTEMUKSIA TUTKIMUKSEN VARRELTA

Tutkimusprosessi tämän työn muodostamiseksi on ollut vaativa, mutta antoisa. Työ on laadittu pitkälti koronaviruksen säestämänä, jolloin kirjaston käyttö on ollut paikoin mahdotonta. Tämä on aiheuttanut omat haasteensa lähteiden hankkimisessa. Työ on kuitenkin edennyt useiden pohdintojen saattamana askel askeleelta kohti lopullista muotoansa.

Tutkimuksen keskeiset aihekokonaisuudet eivät olleet minulle ennestään erityisen tuttuja, joten tutkimusasetelman ja -menetelmien muodostaminen ovat tapahtuneet pitkälti tutkimusprosessin aikana. Olen saanut työlleni monesta pienestä palasesta koostuvaa ohjausta, jota olen yrittänyt koostaa eheäksi kokonaisuudeksi. Työ on ollut suurelta osin hyvin itsenäistä, joten olen joutunut useasti kyseenalaistamaan tutkimustani.

Työn kokonaismerkitys jääköön jokaisen lukijan omaksi pohdittavaksi, mutta itselleni työn merkitys on muodostunut ennen kaikkea oppimisprosessista, sekä ainakin itselleni mielenkiintoisten tulosten löytymisestä. Tutkimusmenetelmien muodostaminen ja haltuunotto ovat haastaneet itseni syventymään sekä teorian, että käytännön tasolla valunnamallinnuksen konkretian ytimeen. Tämä askel on ollut erityisen merkityksellinen itselleni ja sen läpikäyminen on avannut uusia mahdollisuuksia tulevaisuuteni suhteen. Tutkimuksen aiheen löytymiseen ja valintaan olen kokonaisuudessaan tyytyväinen.

8. LÄHTEET

Kirjalliset lähteet

- Albrecht, J. (2007). *Key Concepts and Techniques in GIS*. SAGE Publications Ltd, Lontoo. 103 s.
- Andreev, D. V. (2019). The use of GIS technology in modern conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 421: 4.
- Aroviita, J., S. Mitikka & S. Vienonen. (2019). Pintavesien tilan luokittelu ja arviointiperusteet vesienhoidon kolmannella kaudella. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja* 37. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- Baker, M. E., D. E. Weller, T. E. Jordan. (2006). Improved methods for quantifying potential nutrient interception by riparian buffers. *Landscape Ecology* 21: 8, 1327–1345.
- Bertolo, F. (2000). *Catchment delineation and characterization*. Space Applications Institute, Joint Research Centre Ispa, Italy 31 s.
- Choi, Y. (2012). A new algorithm to calculate weighted flow-accumulation from a DEM by considering surface and underground stormwater infrastructure. *Environmental Modelling and Software* 30, 81–91.
- Dawsen, C. J. (2011). *Geographic Information Systems*. Nova Science Publishers, New York. 153 s.
- Eriksson, E., K. Auffarth, M. Henze & A. Ledin. (2002). Characteristics of grey water. *Urban Water* 4. 85–104. Oxford.
- Fairfield, J. & P. Leymarie. (1991) Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research* 27, 709–717.
- Galati, S. R. (2006). *Geographic Information Systems Demystified*. Artech House, Norwood. 270 s.
- Greenlee, D. D. (1987). Raster and Vector Processing for Scanned Linework. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53: 10, 1383–1387.

- Hagman A-M. (2010). Kalljärven kuormitusselvitys ja kunnostussuunnitelma. *Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja 7*, Helsinki. 50 s.
- Heino, S. (2017). Haja-asutuksen jätevedet – lainsäädäntö ja käytännöt. *Ympäristöopas*. Ympäristöministeriö, Helsinki. 67 s.
- Huang, P-C. & K. T. Lee. (2015). Distinctions of geomorphological properties caused by different flow-direction predictions from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science* 30: 2, 1–18.
- Huttunen, I., M. Huttunen, V. Piirainen, M. Korppoo, A. Lepistö, A. Räike, S. Tattari & B. Vehviläinen, (2016). A national scale nutrient loading model for Finnish watersheds – VEMALA. *Environmental Modelling and Assessment* 21: 1, 83–109.
- Jenson, S. K., & C. M. Trautwein. (1987) *Methods and applications in surface depression analysis*. U.S. Geological Survey, South Dakota. 8 s.
- Jenson, S. K., & J. O. Domingue. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54: 11, 1593–1600.
- Kaloinen, J. & E. Santala. (2009). Haja-asutusalueiden jätevesihuollon tehostamisen toimeenpano. *Ympäristöhallinnon ohjeita*. Ympäristöministeriö, Helsinki. 96 s.
- Kemp, K. K. (2008). *Encyclopedia of Geographic Information Science*. SAGE Publications. 558 s.
- Kim, S. & H. Lee. (2004). A digital elevation analysis: a spatially distributed flow apportioning algorithm. *Hydrological Processes* 18: 10, 1777–1794.
- Liu, J., S. Liu, L.L. Tieszen, M. Chen. (2007). Estimating soil erosion using the USPED model and consecutive remotely sensed land cover observations. *Summer Simulation Multiconference* 2, 1367–1372.
- Longley, P., M. F. Goodchild, M. D. Maguire & D. W. Rhind. (2011). *Geographic information system & science*. 3. p. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 539 s.

- Maa ja metsätalous ministeriö. (2006). *Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja -vaihtoehdot*. Työryhmämuistio, Helsinki.
- Maakuntavaltuusto, Pohjois-Pohjanmaan liitto. *Pohjois-Pohjanmaan maakuntaohjelma 2007–2010*. Ympäristöselostus, Oulu.
- Maanmittauslaitos. (2016). Korkeusmallit-laatukäsikirja. *Kansallisen maastotietokannan laatumalli*, Masala. 17 s.
- Matejicek, L. (2010). *Environmental modeling with GIS*. Nova Science Publishers, New York. 190 s.
- Maune, D.F. (2007). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. 2. p. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda. 655 s.
- Moussa, R. & N. Chahinian. (2009). Comparison of different multiobjective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events. *Hydrology and Earth Systems Sciences* 13, 519–535.
- Mujumdar, P. P. & D. N. Nageshin (2012) *Floods in a changing climate: Hydrologic modeling*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 177 s.
- Neteler M. & H. Mitasova. (2008). *Open source GIS: a GRASS GIS approach*. 3. p. Springer Science+Business Media, New York. 434 s.
- Nielson, D. (2014). *Geographic Information Systems (GIS): Techniques, Applications and Technologies*. Nova Science Publishers, New York. 351 s.
- Niiranen, A., S. Bäck, E. Melkas, J. Jantunen, M. Riipinen, J. Lammila, K. Savolainen, J. Pönni, S. Toivikko, A. Heinonen, K. Mäkinen, R. Airikkala, M. Hakamäki, M. Ollikainen, R. Vilpas, E. Werdi & J. Kallio. (2015) *Vuoden 2015 hajajätevesityöryhmän raportti*. Helsinki. 58 s.
- O’Callaghan, J. & D. Mark. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing* 28, 323–344. Canberra.

- Obermeyer, N. J. & J. K. Pinto (2008). *Managing Geographic Information Systems*. 2.p. The Guilford Press, New York. 360 s.
- Oksanen, J. & T. Sarjakoski (2005): Error propagation analysis of DEM-based drainage basin de-lineation. *International Journal of Remote Sensing* 26, 3085–3102.
- Pilesjö, P. & Q. Zhou. (1997). Theoretical estimation of flow accumulation from a grid-based digital elevation model. *GIS AM/FM ASIA '97 and Geoinformatics '97 Conference (Taipei)*, 447–456.
- Planchon, O. & F. Darboux. (2002). A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena* 46: 2, 159–176.
- Qin, C., A.-X. Zhu, T. Pei, B. Li, C. Zhou & L. Yang. (2007). An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple flow-direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science* 21: 4, 443–458.
- Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, O. Planchon. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processing* 5, 59–79.
- Ridderstolpe, P. (2004). *Introduction to Greywater Management*. EcoSanRes. Stockholm environment institute, Tukholma. 19 s.
- Salmi, M., T. Räsänen & J. Hämäläinen. (2013). Kosteusindeksi puunkorjuun olosuhteiden ennakkoinnissa. *Metsätehon raportti 229*. Metsäteho, Vantaa. 32 s.
- Saunders, W. (1999). Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis, *Esri User Conference*.
- Schäuble, H., M. Oswald & M. Hinderer. (2008). A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers & Geosciences* 34: 6, 635–646.

- Schmidt, C., R. Kumar, S. Yang & O. Büttner. (2020). Microplastic particle emission from wastewater treatment plant effluents into river networks in Germany: Loads, spatial patterns of concentrations and potential toxicity. *Science of The Total Environment* 737. 11 s.
- Seibert, J. & B. L. McGlynn. (2007). A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research* 43: 4.
- Shahab, A. (2008). *GIS Basics*. New Age International, New Delhi. 339 s.
- Shrivastav M., S.K. Mickelson & D. Webber. (2020). Using ArcGIS hydrologic modeling and LiDAR digital elevation data to evaluate surface runoff interception performance of riparian vegetative filter strip buffers in central Iowa. *Journal of Soil and Water Conservation* 75: 1, 123–129.
- Souza, F.P., M.E.L. Costa & S. Koide. (2019). Hydrological modelling and evaluation of detention ponds to improve urban drainage system and water quality. *Water* 11: 8.
- Stichbury, G., L. Vrabyn, T. G. A. Green & C. Craig. (2011). Spatial modelling of wetness for the Antarctic Dry Valleys. *Polar Research* 30: 1.
- Särkelä, A. & K. Lahti. (2013). Haja-asutuksen jätevesien koostumus ja jätevesijärjestelmien toimivuus. *Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry julkaisu* 68/2013
- Takanobu, I. & E. Senichi. (1991). Runoff characteristic of COD, BOD, C, N and P loadings from river to enclosed coastal seas. *Marine Pollution Bulletin* 23, 11–14.
- Tarboton, D. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, 33: 2, 309–319.
- Tarboton, D., R. Bras & I. Rodriguez-Iturbe. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological processes* 5, 81–100. Cambridge, USA.

- Tuhkanen, T., J. Aho, E. Merta. (2005). Haja-asutuksen ravinnekuormituksen vähentäminen – Ravinnesampo. Osa 2: Maitohuonejätevesien käsittely. *Suomen ympäristö 763*. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- Wang, Y., H. J. Montas, K. L. Brubaker, P. T. Leisnham, A. Shirmohammadi, V. Chanse & A. K. Rockler. (2017). Impact of Spatial Discretization of Hydrologic Models on Spatial Distribution of Nonpoint Source Pollution Hotspots. *Journal of Hydrologic Engineering* 21: 2.
- Vehviläinen, B., (1994). The watershed simulation and forecasting system in the National Board of Waters and the Environment. *Publications of the Water and Environment Research Institute* 17, 3–16.
- Verdin, K., & S. Jenson. (1996). Development of continental scale DEMs and extraction of hydrographic features. *Third Conference on GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, New Mexico, NCGIA.
- Vilpas, R., K. Kujala-Räty, T. Laaksonen & E. Santala. (2005). Haja-asutuksen ravinnekuormituksen vähentäminen – Ravinnesampo. Osa 1: Asumisjätevesien käsittely. *Suomen ympäristö 762*. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 111 s.
- Wilson, J. P. & J. C. Gallant (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons. 520 s.
- Vuorela, M. (2001). *Maasuodattimien ja Green Pack kivivillasuodattimien toimivuus Ilmajoen, Nurmon, Seinäjoen, Peräseinäjoen ja Ylistaron kuntien alueella vuosina 1998 ja 2000, 2001*. Ilmajoen ympäristölautakunta. 8 s.
- Yuan, L., T. Sinshaw & K. J. Forshay. (2020). Review of Watershed-Scale Water Quality and Nonpoint Source Pollution Models. *Geosciences* 10: 25. 33 s.

Verkkojulkaisut ja muut lähteet

ArcGIS Pro. Next-generation Desktop GIS. Esri. <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>>. 25.11.2019.

Corine maanpeite 2012. Suomen ympäristökeskus.
<<http://metatieto.ymparisto.fi:8080/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7BD54C552F-F7F7-489B-8B1E-E093D93C7386%7D>>. 3.3.2020.

Facta ja kuntanet – kuntarekisteri ja paikkatietoratkaisut. CGI.
<<https://www.cgi.fi/fi/tuoteratkaisut/facta>>. 25.11.2019.

Finnish Consulting Group (2019). Julkaisematon kuormitusselvitys.

Hajajätevesien YSL:n mukaiset siirtymäaika-alueet. (2017). Suomen ympäristökeskus.
<<http://metatieto.ymparisto.fi:8080/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid={371AF96F-B31D-4ED8-9CD5-EE7B68CB04D7}>>. 25.11.2019.

Hertta ympäristötietojärjestelmä. <<https://wwwp2.ymparisto.fi/scripts/kirjaudu.asp>>. 25.11.2019.

Huttunen, M. (2020). VEMALA etäisyysvaikutus ja Pattijoen fosforikuormitus. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 13.5.2020.

Kiinteistörekisteri. Maanmittauslaitos.
<<https://www.maanmittauslaitos.fi/kiinteistot/asiantuntevalle-kayttajalle/kiinteistotiedot-ja-niiden-hankinta/kiinteistorekisteri>>. 25.11.2019.

Lainsäädäntö. Suomen sähköinen säädöskokoelma. <<https://www.finlex.fi>>. 3.3.2020.

Maastotietokanta. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/maastotietokanta-0>>. 25.11.2019.

Paituli. Paikkatietoaineistojen metatiedot. <<https://avaa.tdata.fi/web/paituli/metadata>> 26.10.2020.

Raahen kaupunki. <<https://raahe.fi/>>. 25.11.2019.

VALUE-virtaussuuntamalli. Suomen ympäristökeskus. <https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Vesi/Tietoaaineistot_ja_jarjestelmat/Valumaaluejarjestelma/VALUE_virtaussuuntamalli>. 3.3.2020.

Väestörekisterikeskus. <<https://vrk.fi/vaestorekisterikeskus>>. 25.11.2019.

Liitteet:

Liite 1. Jätevesikyselyn saatekirje



Saatekirje

07.08.2019

Haja-asutusalueen jätevesikysely

Arvoisa kiinteistön omistaja

Haja-asutusalueen jätevesien käsittelyä koskeva lainsäädäntö uudistui keväällä 2017. Nykyinen ympäristönsuojelulaki (527/2014, YSL) asettaa rantavyöhyke- sekä pohjavesialueen kiinteistöjen jätevesijärjestelmille uudet puhdistusvaatimukset sekä siirtymäajan. Jos rakennuksesi sijaitsee enintään 100m päässä vesistöstä tai merestä tai pohjavesialueella tulee jätevesijärjestelmä kunnostaa lain vaatimalle tasolle 31.10.2019 mennessä, ellei järjestelmä jo täytä vaatimuksia.

Seuraavat kiinteistöenne sisältävät rakennuksia, jotka sijaitsevat Suomen ympäristökeskuksen alueen (vesistöjen sadan metrin vyöhyke ja pohjavesialueet) mukaan rantavyöhykkeellä tai pohjavesialueella:

748-xxx-xxxx-xxxx

Pyydämme Teitä täyttämään ja palauttamaan liitteenä olevat kyselylomakkeet kaikkien rakennusten osalta, joissa syntyy jätevettä. Toivomme kyselyyn vastattavan huolimatta jätevesijärjestelmän-, rakennuksen- tai kunnostamisaikojen nykytilasta/suunnitelmista/keskeneräisyydestä.

Liite 1 koskee nykyisen jätevesijärjestelmän tilaa ja Liite 2 mahdollista kunnostamissuunnitelmaa.

Lupavaatimukset

Jätevesijärjestelmän kunnostaminen vaatii aina toimenpideluvan, jota voitte hakea osoitteesta www.lupapiste.fi

Lisätietoa kiinteistön jätevesien käsittelystä löytyy osoitteesta www.ymparisto.fi -> *Rakentaminen* -> *Rakennushanke* -> *Talotekniset järjestelmät (LVI)* -> *Kiinteistön jätevesien käsittely*.

Puolueetonta neuvontaa tarjoaa myös *Pro Agria Oulu, Merja Talvitie 045 657 8611*

Yhteistyöterveisin,

Matias Vänntilä

RAAHEN KAUPUNKI

Ympäristönvalvonta

ymparisto@raahe.fi, 040 130 3842

Liite 2. Jätevesikyselyn kyselylomake



SELVITYS NYKYISESTÄ JÄTEVESIJÄRJESTELMÄSTÄ (MRL 129 §)

Saapumispvm:

Dnro: 424/110401/2019

HUOM! TÄYTÄ JOKAISTA JÄTEVEDEN KÄSITTELY- TAI PURKUJÄRJESTELYÄ KOHTI OMA LOMAKE!

Lomake mahdollista palauttaa myös sähköpostiosoitteeseen: ymparisto@raahe.fi Sähköinen lomake löytyy osoitteesta: https://raahe.fi/luonto-ja-ymparisto/ohjeet-ja-maaraykset			
1. Kiinteistön omistaja(t)	Nimi ja syntymäaika		
	Lähiosoite		Puhelin
	Postinumero ja postitoimipaikka		Sähköposti
2. Kiinteistö	Tilan nimi	Kiinteistönumero	Kylä / kaupunginosa
	Lähiosoite, postinumero ja postitoimipaikka		Tilan pinta-ala m ²
	Maaperä <input type="checkbox"/> Kallio <input type="checkbox"/> Hiekka <input type="checkbox"/> Savi <input type="checkbox"/> Turve <input type="checkbox"/> Muu, mikä?		
	Kiinteistö sijaitsee Pohjavesialueella <input type="checkbox"/> Ei <input type="checkbox"/> Kyllä, mikä? Ranta-alueella (100 m vesistöä) <input type="checkbox"/> Ei <input type="checkbox"/> Kyllä, mikä?		
3. Rakennus	<input type="checkbox"/> Omakotitalo Asukkaiden määrä _____ hlöä <input type="checkbox"/> Muu, mikä? <input type="checkbox"/> Vapaa-ajan asunto, käytetään _____ kk/v Huoneistoala _____ m ² <input type="checkbox"/> Sauna		
	Talousveden saanti ja jätevesien vaikuttavat varusteet <input type="checkbox"/> Vesijohto, jonka vesihana sijaitsee rakennuksen <input type="checkbox"/> Sisäpuolella <input type="checkbox"/> Ulkopuolella <input type="checkbox"/> Oma kaivo (kantamalla) <input type="checkbox"/> Oma kaivo (hana rakennuksen sisällä) <input type="checkbox"/> Muu, mikä? <input type="checkbox"/> Suihku _____ kpl <input type="checkbox"/> Sauna <input type="checkbox"/> Lämminvesivaraaja <input type="checkbox"/> Pyykinpesukone/astianpesukone <input type="checkbox"/> Kylpyamme/poreallas/uima-allas <input type="checkbox"/> Muu, mikä? Veden kulutus yhteensä _____ m ³ /vuosi		
4. Käymälän tyyppi	<input type="checkbox"/> Vesikäymälä, _____ kpl <input type="checkbox"/> Muu, mikä? <input type="checkbox"/> Kompostikäymälä, jossa virtsa <input type="checkbox"/> Kerätään umpisäiliöön _____ m ³ , josta se viedään, minne? _____ <input type="checkbox"/> haihdutetaan		
Jätevesien käsittely	Viemäriverkosto <input type="checkbox"/> Jätevedet johdetaan viemäriverkostoon Saostuskaivot <input type="checkbox"/> Jätevedet johdetaan _____-osaisen saostuskaivon kautta <input type="checkbox"/> Maasuodattamoon <input type="checkbox"/> Maaimeyttämöön <input type="checkbox"/> Muualle, minne? _____ Suodattamon/imeyttämön rakentamisvuosi _____ Suodattamoon/imeyttämöön kuuluu fosforinpoiston tehostamismenetelmä? <input type="checkbox"/> Ei <input type="checkbox"/> Kyllä Arvio pohjaveden etäisyydestä maanpinnasta suodattamon/imeyttämön kohdalla _____ m		
	Umpisäiliö <input type="checkbox"/> Kaikki jätevedet johdetaan umpisäiliöön <input type="checkbox"/> Vesikäymälän jätevedet johdetaan umpisäiliöön Umpisäiliöstä jätevedet viedään, minne? _____ Tyhjennysajoneuvo pääsee _____ metrin päähän umpisäiliöstä		
	Umpisäiliön materiaali <input type="checkbox"/> Muovi <input type="checkbox"/> Lasikuitu <input type="checkbox"/> Muu, mikä? _____ Umpisäiliön tilavuus _____ m ³ Umpisäiliön valmistamisvuosi _____		

	Muut <input type="checkbox"/> Kivipesä <input type="checkbox"/> Sauna-/mökkikaivo <input type="checkbox"/> Kiinteistökohtainen pienpuhdistamo <input type="checkbox"/> Kiinteistökohtainen pakettisuodatin <input type="checkbox"/> Muu, mikä?		Valmistaja _____, Malli _____ Valmistaja _____, Malli _____ Valmistaja _____, Malli _____ Valmistaja _____, Malli _____																					
5. Jäteveden johtaminen	Puhdistukseen tulevasta ja sieltä lähtevästä jätevedestä voidaan ottaa näyte <input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei <input type="checkbox"/> Vain tulevasta <input type="checkbox"/> Vain lähtevästä	Puhdistettu jätevesi johdetaan <input type="checkbox"/> Maahan <input type="checkbox"/> Ojaan <input type="checkbox"/> Muu, mikä?																						
6. Etäisyydet	<table border="0"> <thead> <tr> <th></th><th><i>Käsittelypaikka</i></th><th><i>Purkupaikka</i></th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Etäisyys kunnallisesta viemäriverkostosta</td><td>_____ metriä</td><td></td></tr> <tr> <td>Etäisyys lähimmästä (koskee myös omia rakennuksia) asuin- tai muusta rakennuksesta</td><td>_____ metriä</td><td>_____ metriä</td></tr> <tr> <td>Etäisyys lähimmästä rajasta</td><td>_____ metriä</td><td>_____ metriä</td></tr> <tr> <td>Etäisyys lähimmästä vesikaivosta tai vedenottamosta</td><td>_____ metriä</td><td>_____ metriä</td></tr> <tr> <td>Etäisyys vesistöä (joki, puro, järvi, meri tmv.)</td><td>_____ metriä</td><td>_____ metriä</td></tr> <tr> <td>Etäisyys pohjavesialueesta</td><td>_____ metriä</td><td>_____ metriä</td></tr> </tbody> </table>				<i>Käsittelypaikka</i>	<i>Purkupaikka</i>	Etäisyys kunnallisesta viemäriverkostosta	_____ metriä		Etäisyys lähimmästä (koskee myös omia rakennuksia) asuin- tai muusta rakennuksesta	_____ metriä	_____ metriä	Etäisyys lähimmästä rajasta	_____ metriä	_____ metriä	Etäisyys lähimmästä vesikaivosta tai vedenottamosta	_____ metriä	_____ metriä	Etäisyys vesistöä (joki, puro, järvi, meri tmv.)	_____ metriä	_____ metriä	Etäisyys pohjavesialueesta	_____ metriä	_____ metriä
	<i>Käsittelypaikka</i>	<i>Purkupaikka</i>																						
Etäisyys kunnallisesta viemäriverkostosta	_____ metriä																							
Etäisyys lähimmästä (koskee myös omia rakennuksia) asuin- tai muusta rakennuksesta	_____ metriä	_____ metriä																						
Etäisyys lähimmästä rajasta	_____ metriä	_____ metriä																						
Etäisyys lähimmästä vesikaivosta tai vedenottamosta	_____ metriä	_____ metriä																						
Etäisyys vesistöä (joki, puro, järvi, meri tmv.)	_____ metriä	_____ metriä																						
Etäisyys pohjavesialueesta	_____ metriä	_____ metriä																						
7. Toimenpiteet	Oma arviosi jatkotoimenpiteistä <input type="checkbox"/> Jätevesijärjestelmäni täyttää lain vaatimukset <input type="checkbox"/> Jätevesijärjestelmäni vaatii päivittämistä (Lisää liite 2.) Muita asiaan vaikuttavia tekijöitä?																							
8. Allekirjoitus	<i>Allekirjoitus ja nimenselvennys</i> _____	<i>Paikka ja päivämäärä</i> _____																						
9. Ohjeita	<i>Sanojen selityksiä</i> <table border="0"> <tr> <td>Umpisäiliö</td><td>Jäteveden ja lietteen tilapäiseen varastointiin tarkoitettu vesitiivis säiliö</td></tr> <tr> <td>Saostussäiliö</td><td>Yksi- tai useampiosainen vesitiivis jäteveden käsittely, joka erottaa jätevedestä vettä raskaammat ja kevyemmät aineet. (vanha nimitys sakokaivo)</td></tr> <tr> <td>Maasuodattamo</td><td>Käsittely, jossa esikäsitelty jätevesi suodatetaan rakennetun (muusta maaperästä vesitiiviisti erotetun) maakerroksen läpi ja kootaan putkistolla edelleen johdettavaksi.</td></tr> <tr> <td>Maahanimeyttämö</td><td>Käsittely, jossa jätevesi imeytetään maaperään, josta se kulkeutuu pohjaveteen.</td></tr> <tr> <td>Pohjaveden etäisyys maanpinnasta</td><td>Arvion pohjaveden etäisyydestä maanpinnasta voi tehdä esim. kiinteistön rengaskai- von avulla: kuinka kaukana maanpinnasta veden pinta kaivossa on, kun kaivossa on to- della hyvin vettä.</td></tr> <tr> <td>Pienpuhdistamo</td><td>Käsittelylaite, jossa jätevesi johdetaan laitteeseen, joka perustuu kemiallisiin, fysikaali- siin, biologisiin prosesseihin ja/tai niiden yhdistelmiin.</td></tr> <tr> <td>Pakettisuodatin</td><td>Käsittelylaite, jossa jätevettä puhdistetaan suodattamalla se jonkin materiaalin läpi.</td></tr> </table>			Umpisäiliö	Jäteveden ja lietteen tilapäiseen varastointiin tarkoitettu vesitiivis säiliö	Saostussäiliö	Yksi- tai useampiosainen vesitiivis jäteveden käsittely, joka erottaa jätevedestä vettä raskaammat ja kevyemmät aineet. (vanha nimitys sakokaivo)	Maasuodattamo	Käsittely, jossa esikäsitelty jätevesi suodatetaan rakennetun (muusta maaperästä vesitiiviisti erotetun) maakerroksen läpi ja kootaan putkistolla edelleen johdettavaksi.	Maahanimeyttämö	Käsittely, jossa jätevesi imeytetään maaperään, josta se kulkeutuu pohjaveteen.	Pohjaveden etäisyys maanpinnasta	Arvion pohjaveden etäisyydestä maanpinnasta voi tehdä esim. kiinteistön rengaskai- von avulla: kuinka kaukana maanpinnasta veden pinta kaivossa on, kun kaivossa on to- della hyvin vettä.	Pienpuhdistamo	Käsittelylaite, jossa jätevesi johdetaan laitteeseen, joka perustuu kemiallisiin, fysikaali- siin, biologisiin prosesseihin ja/tai niiden yhdistelmiin.	Pakettisuodatin	Käsittelylaite, jossa jätevettä puhdistetaan suodattamalla se jonkin materiaalin läpi.							
Umpisäiliö	Jäteveden ja lietteen tilapäiseen varastointiin tarkoitettu vesitiivis säiliö																							
Saostussäiliö	Yksi- tai useampiosainen vesitiivis jäteveden käsittely, joka erottaa jätevedestä vettä raskaammat ja kevyemmät aineet. (vanha nimitys sakokaivo)																							
Maasuodattamo	Käsittely, jossa esikäsitelty jätevesi suodatetaan rakennetun (muusta maaperästä vesitiiviisti erotetun) maakerroksen läpi ja kootaan putkistolla edelleen johdettavaksi.																							
Maahanimeyttämö	Käsittely, jossa jätevesi imeytetään maaperään, josta se kulkeutuu pohjaveteen.																							
Pohjaveden etäisyys maanpinnasta	Arvion pohjaveden etäisyydestä maanpinnasta voi tehdä esim. kiinteistön rengaskai- von avulla: kuinka kaukana maanpinnasta veden pinta kaivossa on, kun kaivossa on to- della hyvin vettä.																							
Pienpuhdistamo	Käsittelylaite, jossa jätevesi johdetaan laitteeseen, joka perustuu kemiallisiin, fysikaali- siin, biologisiin prosesseihin ja/tai niiden yhdistelmiin.																							
Pakettisuodatin	Käsittelylaite, jossa jätevettä puhdistetaan suodattamalla se jonkin materiaalin läpi.																							

HUOM! TÄYTÄ LOMAKE JOS SINULLA ON SUUNNITELMA JÄTEVESIJÄRJESTELMÄSI PÄIVITTÄMISESTÄ

TÄYTÄ JOKAISTA JÄTEVEDEN KÄSITTELY- TAI PURKUJÄRJESTELYÄ KOHTI OMA LOMAKE!

Lomake mahdollista palauttaa myös sähköpostiosoitteeseen: ymparisto@raahe.fi Sähköinen lomake löytyy osoitteesta: https://raahe.fi/luonto-ja-ymparisto/ohjeet-ja-maaraykset		
1. Käymälän tyyppi	<input type="checkbox"/> Vesikäymälä, _____ kpl <input type="checkbox"/> Muu, mikä? <input type="checkbox"/> Kompostikäymälä, jossa virtsa	Käyttäviä henkilöitä _____ henkilöä <input type="checkbox"/> Kerätään umpisäiliöön ____ m ³ , josta se viedään, minne? _____ <input type="checkbox"/> haihdutetaan
2. Talousvesi	<i>Talousveden saanti</i> <input type="checkbox"/> Vesijohto, jonka vesihana sijaitsee rakennuksen <input type="checkbox"/> Sisäpuolella <input type="checkbox"/> Ulkopuolella <input type="checkbox"/> Oma kaivo (kantamalla) <input type="checkbox"/> Oma kaivo (hana rakennuksen sisällä) <input type="checkbox"/> Muu, mikä?	
3. Jätevesien käsittely	<i>Viemäriverkosto</i> <input type="checkbox"/> Jätevedet johdetaan viemäriverkostoon <i>Saostuskaivot</i> <input type="checkbox"/> Jätevedet johdetaan _____ -osaisen saostuskaivon kautta <input type="checkbox"/> Maasuodattamoon <input type="checkbox"/> Maimeyttämöön <input type="checkbox"/> Muualle, minne _____ Suodattamon/imeyttämön rakentamivuosi _____ Suodattamoon/imeyttämöön kuuluu fosforinpoiston tehostamismenetelmä? <input type="checkbox"/> Ei <input type="checkbox"/> Kyllä Arvio pohjaveden etäisyydestä maanpinnasta suodattamon/imeyttämön kohdalla _____ m <i>Umpisäiliö</i> <input type="checkbox"/> Kaikki jätevedet johdetaan umpisäiliöön <input type="checkbox"/> Vesikäymälän jätevedet johdetaan umpisäiliöön Umpisäiliöstä jätevedet viedään, minne? _____ Tyhjennysajoneuvo pääsee _____ metrin päähän umpisäiliöstä Umpisäiliön materiaali <input type="checkbox"/> Muovi <input type="checkbox"/> Lasikuitu <input type="checkbox"/> Muu, mikä? Umpisäiliön tilavuus _____ m ³ <i>Muut</i> <input type="checkbox"/> Kivipesä <input type="checkbox"/> Sauna-/mökkikaivo Valmistaja _____, Malli _____ <input type="checkbox"/> Kiinteistökohtainen pienpuhdistamo Valmistaja _____, Malli _____ <input type="checkbox"/> Kiinteistökohtainen pakettisuodatin Valmistaja _____, Malli _____ <input type="checkbox"/> Muu, mikä? Valmistaja _____, Malli _____	
4. Jäteveden johtaminen	Puhdistettu jätevesi johdetaan <input type="checkbox"/> Maahan <input type="checkbox"/> Ojaan <input type="checkbox"/> Muu, mikä?	
5. Aikataulu	Millä aikataululla suunnitelma on tarkoitus toteuttaa?	

6. Muuta	Aion hakea vapautusta / poikkeuslupaa <input type="checkbox"/> Korkean iän vuoksi <input type="checkbox"/> Sosiaalisin perustein <input type="checkbox"/> Investoinnin kohtuuttomuuden perustella <input type="checkbox"/> Muu syy, mikä? Muita suunnitelmaan vaikuttavia asioita?	
7. Allekirjoitus	<i>Allekirjoitus ja nimenselvennys</i>	<i>Paikka ja päivämäärä</i>